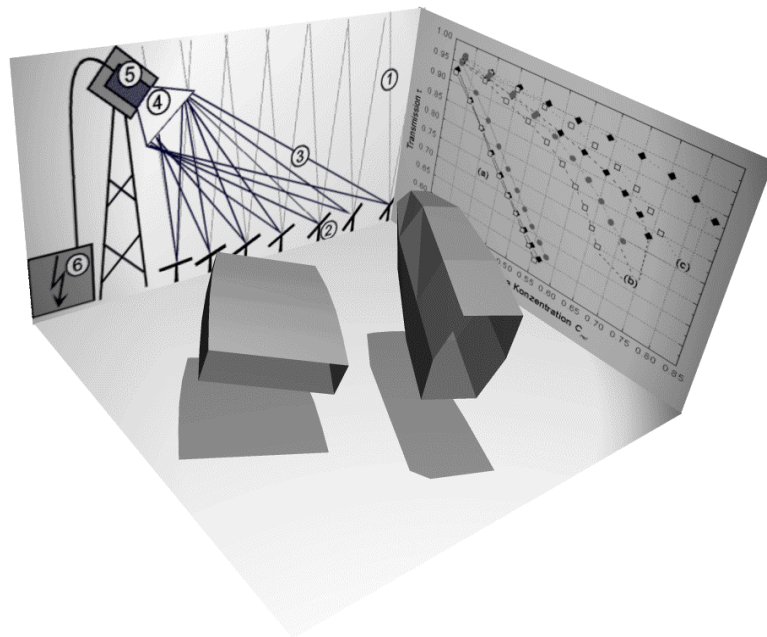


# Sekundärreflektoren für Solarturmkraftwerke

Dissertation der Fakultät für Physik  
der  
Ludwig-Maximilians-Universität München



vorgelegt von Andreas Timinger  
aus München

München, den 10. März 1999

Diese Arbeit wurde im Rahmen eines Vorhabens erstellt, das aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0320675 gefördert wurde. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

1. Gutachter: Professor J. Feldmann

2. Gutachter: Professor H. Wolter

Tag der mündlichen Prüfung: 2. August 1999



---

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>1 Strahlungstransfer in der geometrischen Optik</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Phasenraum und Konzentration</b>	<b>9</b>
1.1.1 Der Phasenraum der geometrischen Optik	9
1.1.2 Die Schiefe in drei Dimensionen	12
1.1.3 Konzentration von Strahlung	13
<b>1.2 Nichtabbildende Optik</b>	<b>16</b>
1.2.1 Das Randstrahlenprinzip	17
1.2.2 Einige nichtabbildende Reflektorformen	19
1.2.3 Grenzen der analytischen Methoden	21
<b>1.3 Strahlverfolgung und Optimierung</b>	<b>22</b>
<b>2 Heliostatenfeld und Solarturmkraftwerk</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Konzept des Solarturmkraftwerks</b>	<b>25</b>
2.1.1 Schematischer Aufbau	26
2.1.2 Die einzelnen Komponenten	26
2.1.3 Verluste und Gesamtwirkungsgrad	29
<b>2.2 Abbildungsfehler und Verluste beim Heliostatenfeld</b>	<b>31</b>
<b>2.3 Die Strahlung im Fokus eines Heliostatenfeldes</b>	<b>35</b>
2.3.1 Das Heliostatenfeld am Weizmann Institute of Science	35
2.3.2 Die Verteilung der Strahlung im Ortsraum	37
2.3.3 Die Verteilung im Richtungsraum	37
<b>2.4 Thermisch mehrstufige Nutzung</b>	<b>40</b>
<b>3 Ergebnisse: Sekundärreflektoren für Solarturmkraftwerke</b>	<b>43</b>
<b>3.1 Maßschneiden nach Randstrahlen in zwei Dimensionen</b>	<b>44</b>
<b>3.2 Konische Sekundärreflektoren</b>	<b>48</b>
3.2.1 Das Heliostatenfeld	48

3.2.2 Die Form der konischen Sekundärreflektoren	49
3.2.3 Die Optimierung	51
3.2.4 Die Ergebnisse	52
<b>3.3 Reflektoren für homogene, rotationssymmetrische Strahlung</b>	<b>53</b>
3.3.1 Technische Rahmenbedingungen	54
3.3.2 Parameterisierung der Formen	55
3.3.3 Die verwendete Strahlung	56
3.3.4 Transmission der optimierten Formen	57
3.3.5 Formen der optimierten Reflektoren	60
3.3.6 Zusammenfassung	62
<b>3.4 Reflektoren für den zentralen Bereich der Fokalebene eines Heliostatenfeldes</b>	<b>62</b>
3.4.1 Die Strahlung	63
3.4.2 Ansatz für einen Reflektor mit glatter Oberfläche	64
3.4.3 Kennlinien für Reflektoren mit glatter Oberfläche	66
3.4.4 Ansätze für Reflektoren aus ebenen Facetten	67
3.4.5 Kennlinien für die Reflektoren aus ebenen Facetten	69
3.4.6 Ansatz für einen Reflektor aus eindimensional gekrümmten Elementen	71
3.4.7 Ergebnisse für Reflektoren aus eindimensional gekrümmten Elementen	72
3.4.8 Vergleich der verschiedenen Reflektorformen	73
<b>3.5 Reflektoren für homogene Strahlung aus einem elliptischen Richtungsbereich</b>	<b>75</b>
3.5.1 Die Einstrahlung	75
3.5.2 Reflektorformen	76
3.5.3 Ergebnisse	77
<b>4 Messungen an einem Sekundärreflektor mit rechteckigem Querschnitt</b>	<b>81</b>
<b>4.1 Der Reflektor</b>	<b>82</b>
4.1.1 Abmessungen des Reflektors	82
4.1.2 Technischer Aufbau des Reflektors	83
4.1.3 Der Laboraufbau	84
4.1.4 Strahlverfolgungsrechnungen	85
<b>4.2 Optische Messungen</b>	<b>86</b>
4.2.1 Die Meßmethode	86
4.2.2 Durchführung der Messungen	88
4.2.3 Ergebnisse	90
<b>4.3 Kalorimetrische Messungen</b>	<b>94</b>

4.3.1 Messung der Bestrahlungsstärkeverteilung	95
4.3.2 Messung der absorbierten Leistung im Kalorimeter	96
4.3.3 Durchführung der Messungen	96
4.3.4 Ergebnisse	97
<b>5 Ausblick</b>	<b>99</b>
5.1 Reflektoren für den Randbereich der Fokalebene eines Heliostatenfeldes	99
5.1.1 Strahlung	99
5.1.2 Berechnungen für einen Aufbau am WIS	100
5.1.3 Weitergehende Ansätze	102
5.2 Optimierung des optischen Konzeptes von Solarturmkraftwerken	103
<b>Literatur</b>	<b>107</b>
<b>Danksagung</b>	<b>115</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>117</b>





---

## Zusammenfassung

Sekundärreflektoren werden in Solarturmkraftwerken eingesetzt, um die Strahlung im Fokus eines Spiegelfeldes weiter zu konzentrieren. Das bedeutet, die Strahlung wird auf eine kleinere Fläche übertragen und dabei Leistung pro Fläche, die Bestrahlungsstärke erhöht. Dies ermöglicht höhere Temperaturen im Arbeitsmedium, das die Strahlung absorbiert, und somit höhere Wirkungsgrade im angeschlossenen Wärme-Kraft-Prozeß.

Sekundärreflektoren zur Konzentration von Strahlung können mit analytischen Methoden der nichtabbildenden Optik entworfen werden, die auf der thermodynamischen Beschreibung von Strahlungstransfer im vierdimensionalen Phasenraum der geometrischen Optik beruhen. Die Erhaltung des Phasenraumvolumens und die topologischen Eigenschaften der optischen Transferfunktion ermöglichen die Gestaltung von Reflektoren, die in zwei Dimensionen eine gegebene Quellstrahlung exakt in die gewünschte Zielstrahlung überführen. In drei Dimensionen jedoch sind die Gleichungen zur Bestimmung der Reflektorform überdefiniert.

Aufgrund dieser grundsätzlichen Einschränkungen werden bislang Reflektorformen eingesetzt, die unter Annahme von perfekten optischen Materialien für homogene Strahlung aus einem translations- oder rotationssymmetrischen Richtungsbereich entworfen wurden. Den spezifischen Inhomogenitäten und Asymmetrien der Strahlung im Fokus eines Spiegelfeldes wurde keine Rechnung getragen, wodurch der Gesamtwirkungsgrad von Solarturmkraftwerken deutlich begrenzt wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden neuartige Reflektorformen entwickelt. Sie beruhen auf Entwürfen, die mit analytischen Methoden unter Einbeziehung der spezifischen Asymmetrien der Strahlung gefunden wurden. Ausgehend von diesen analytischen Entwürfen wurde die Form der Reflektoren in einem numerischen Optimierungsprozeß variiert. Bei der Optimierung wurden realistische technische Rahmenbedingungen wie Absorptionsverluste oder der Aufbau der Reflektoren aus ebenen bzw. eindimensional gekrümmten Facetten berücksichtigt.

Dieser neuartige Ansatz der Kombination von analytischen Entwurfsmethoden und anschließender Optimierung der Form unter realistischen Bedingungen wurde für drei verschiedene Situationen durchgeführt:

- Für Strahlung, die homogen aus einem rotationssymmetrischen Richtungsbe-  
reich auf die Eintrittsapertur des Reflektors einfällt, wurde der Einfluß der  
Unterteilung des Reflektors in ebene Facetten untersucht. Es konnte gezeigt  
werden, daß die optimale Form des Reflektors deutlich von der Anzahl der  
Unterteilungen in Facetten abhängt und in jedem Falle signifikant von der  
analytisch gefundenen Ausgangsform abweicht. Diese Ergebnisse unterstrei-  
chen die Notwendigkeit der Optimierungsrechnungen unter gegebenen Rah-  
menbedingungen.
- Für Strahlung von einem kreisförmigen Spiegelfeld, das nördlich des Fokus  
eines Turmkraftwerkes liegt, wurde ein Sekundärreflektor in Form eines  
asymmetrischen Konus mit analytischen Methoden entworfen. Die Optimie-  
rungsrechnungen zeigen, daß er im Vergleich zu herkömmlichen, rotations-  
symmetrischen Reflektoren bei realistischen Bedingungen um 26 % höhere  
Werte der Bestrahlungsstärke erreicht.
- Für ein experimentelles Spiegelfeld am Weizmann Institute of Science (WIS)  
wurden Sekundärreflektoren entwickelt, die im Zentrum der Fokalebene  
dicht nebeneinander angeordnet werden können. Die Strahlung dieses Feldes  
weist starke Asymmetrien in der Richtungsverteilung auf. Es wurden Reflektoren  
untersucht, die sechseckige oder viereckige Aperturen haben. Für beide  
Formen wurden symmetrische und asymmetrische Formen optimiert. Die be-  
sten Ergebnisse konnten mit asymmetrischen Reflektoren mit rechteckigen  
Aperturen erzielt werden. Mit ihnen läßt sich bei realistischen Bedingungen  
die Bestrahlungsstärke gegenüber symmetrischen Formen um bis zu 137 %  
erhöhen.

Die hervorragenden Eigenschaften der neuartigen Reflektoren mit rechtecki-  
gem Querschnitt konnten darüber hinaus auch allgemein für Strahlung mit ellip-  
tischer Richtungsverteilung bestätigt werden.

Nach im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Entwürfen wurde am WIS ein  
Sekundärreflektor mit rechteckigem Querschnitt konstruiert, der aus acht ebenen  
Facetten zusammengesetzt ist. Der Reflektor wurde in einen bestehenden Ver-  
suchsaufbau am experimentellen Spiegelfeld des WIS integriert.

Am WIS wurden zusätzlich kalorimetrische Messungen zur Bestimmung der  
Transmission von Strahlung durch den Sekundärreflektor durchgeführt. Die  
Messungen sind mit relativen Fehlern von etwa 20 % behaftet, die vor allem auf  
einer Veränderung des Bildes der Sonne im Fokus aufgrund der Bewegung der  
Sonne am Himmel während der Messung beruhen. Innerhalb dieser Fehlergren-  
zen stimmen die Meßergebnisse mit Simulationswerten überein.

Wesentlich genauere Ergebnisse wurden mit einer neuen optischen Meßmethode zur Charakterisierung von Sekundärreflektoren erreicht, die ohne die fehleranfälligen thermischen und radiometrischen Messungen auskommt.. Die Meßmethode basiert auf der Umkehrbarkeit des Strahlweges in der geometrischen Optik. Mit einer diffusen Lichtquelle in der Austrittsapertur wird genau die Strahlung erzeugt, die, wenn man ihre Richtung umkehrt, die Austrittsapertur erreichen würde. Diese Strahlung kann man durch die Eintrittsapertur von verschiedenen Stellen im Spiegelfeld aus fotografieren und erhält somit die Transmission der Strahlung durch den Reflektor mit der vollen vierdimensionalen Auflösung des Phasenraums der geometrischen Optik. Durch Vergleichen der Fotografien mit Simulationsrechnungen kann man die geometrischen Parameter des Reflektors mit hoher Genauigkeit bestimmen.



---

## Einleitung

In solarthermischen Kraftwerken wird die Sonnenstrahlung genutzt, um ein Arbeitsmedium wie Luft oder Öl zu erhitzen. Dieses Arbeitsmedium wird dann als Wärmeträger in einem konventionellen Wärme-Kraft-Prozeß eingesetzt (Duffie 1991; Winter 1991). Die Temperatur des Arbeitsmediums beeinflusst entscheidend den Wirkungsgrad des Umwandlungsprozesses, der physikalisch durch den Carnot-Wirkungsgrad nach oben begrenzt ist. Je höher also die Temperatur des Arbeitsmediums, desto höher ist der erreichbare Wirkungsgrad des Kraftwerkes. Die Sonnenstrahlung, die direkt nur eine Bestrahlungsstärke von maximal  $1 \text{ kW/m}^2$  erreicht, muß gebündelt werden, um die gewünschten hohen Temperaturen im Arbeitsmedium erzeugen zu können. Diese Erhöhung der Bestrahlungsstärke bei damit verbundener Reduktion der bestrahlten Fläche bezeichnet man als Konzentration.

Es gibt verschiedene Konzepte zur solarthermischen Stromerzeugung. Diese unterscheiden sich im wesentlichen durch die elektrische Leistung, die in einer Einheit erzeugt wird, und durch die angestrebte Temperatur des Arbeitsmediums.

- In Parabolrinnenkraftwerken wird die Sonnenstrahlung im Linienfokus von eindimensional gekrümmten Spiegeln auf ein Absorberrohr konzentriert. Diese Spiegel weisen ein parabolisches Profil auf und werden einachsigt nachgeführt. Es werden Temperaturen von typischerweise  $450^\circ\text{C}$  erreicht. Mit Kraftwerken dieses Typs wird seit den siebziger Jahren im Süden der Vereinigten Staaten kommerziell erfolgreich Strom erzeugt (Cohen 1998). Die elektrische Nennleistung der gesamten Anlage beträgt 350 Megawatt. Als erprobte Technologie werden die Parabolrinnenkraftwerke auch als erste Option für eine kurzfristige Ausweitung der solarthermischen Stromerzeugung angesehen (Kolb 1998; Trieb 1998).
- Sogenannten Schälensystemen (Dishes) erreichen höhere Temperaturen, aber geringere Leistung pro Einheit (Winter 1991; Reusch 1998). Der Spiegel hat hier die Form eines kurzbrennweitigen Paraboloids und wird zweiachsigt der Sonne nachgeführt. Im Fokus können Temperaturen bis  $1000^\circ\text{C}$  erreicht werden. Die Spiegel haben eine Fläche von typischerweise  $50 \text{ m}^2$  bis  $150 \text{ m}^2$ . Dementsprechend bewegt sich die elektrische Ausgangsleistung in der Größenordnung von einigen zehn Kilowatt pro Einheit.

- Beim Solarturmkraftwerk wird die Strahlung von einem Feld einzelner, zweiachsig nachgeführter Spiegel an der Spitze eines Turmes fokussiert. Im Fokus können Temperaturen von 1000 °C erreicht werden (Winter 1991). Die Strahlung in der Fokalebene kann jedoch mit einem Sekundärreflektor noch weiter konzentriert werden, um dann Temperaturen von bis zu 1500°C zu erreichen (Kribus 1997). Solarturmkraftwerke werden als Konzept für die nächste Generation von solarthermischen Kraftwerken zur Erzeugung von Strom in der Größenordnung von einigen zehn bis einigen hundert Megawatt elektrischer Leistung entwickelt (Kribus 1998). In einer experimentellen Anlage in Kalifornien wird in einem Turmkraftwerk ohne Sekundärreflektor eine elektrische Durchschnittsleistung von elf Megawatt erzielt. Die Anlage verfügt über einen Wärmespeicher, in dem Energie über Nacht gespeichert werden kann. Der Umwandlungsgrad von solarer Einstrahlung zu elektrischer Leistung beträgt etwa 11 % (Quiston 1998).

Am Weizmann Institute of Science (WIS) in Israel werden Komponenten für Solarturmkraftwerke entwickelt, die die möglichst effiziente Umsetzung der Sonnenstrahlung auf hohem Temperaturniveau erlauben. Die benötigten Temperaturen von über 1200 °C sind ohne einen Sekundärreflektor nicht zu erreichen. Die Vorliegende Arbeit wurde im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes (BMBF-Projekt 0329675) erstellt. Dieses Projekt steht in Kooperation mit einem Projekt am WIS. Es wurden Sekundärreflektoren für die spezielle Situation der experimentellen Anlage am WIS aber auch für allgemeinere Fälle entwickelt. Insbesondere wurden neuartige asymmetrische Reflektorformen entwickelt, die auf den analytischen Methoden der nichtabbildenden Optik beruhen.

Die ersten nichtabbildenden optischen Systeme wurden in den sechziger Jahren für die Teilchenphysik entwickelt (Hinterberger 1966). Dort sollte die stark gerichtete Cerenkov-Strahlung so weit wie möglich konzentriert werden, um das Hintergrundrauschen bei der Messung zu verringern. Nichtabbildende Systeme können auf der Basis einer Thermodynamik des vierdimensionalen Phasenraums der geometrischen Optik beschrieben werden (Winston 1970). Sie behandelt die Gesetzmäßigkeiten von Strahlungstransfer zwischen Flächen, Abbildung wird nicht berücksichtigt. Seit ihren Anfängen werden die Methoden der nichtabbildenden Optik zur Konzentration von Strahlung auf nicht ortsauflösende Detektoren und zur Konzentration von Sonnenstrahlung für die Stromerzeugung (Winston 1974; Rabl 1985) eingesetzt. Eine weitere Anwendung von nichtabbildenden konzentrierenden Systemen besteht im optischen Pumpen von Lasern (Kuppenheimer 1988; Koshel 1993; Tanguy 1998).

In jüngerer Zeit konnten die Methoden der nichtabbildenden Optik deutlich erweitert werden. Insbesondere durch die Entwicklung des Maßschneiderns nach Randstrahlen (Friedman 1993) wurden damit neue Anwendungsgebiete über die Konzentration von Strahlung hinaus erschlossen. Optische Systeme können gezielt auf bestimmte Kriterien, wie die gleichmäßige Verteilung oder die scharfe Abgrenzung der Strahlung, hin ausgelegt werden. Diese Kriterien können exakt erfüllt werden. Die resultierenden optischen Systeme sind oft kompakter als Lösungen aus abbildenden optischen Komponenten.

Beispiele hierfür sind Reflektoren für die Raumbeleuchtung, die eine sehr gleichmäßige Lichtverteilung gewährleisten (Ries 1994), aber auch neuartige Systeme zur Auskopplung von Licht aus einer Faser für die Laserchirurgie und die Sensorik (Feuermann 1998).

Die analytischen Methoden der nichtabbildenden Optik können einige Aspekte reeller optischer Problemstellungen nicht berücksichtigen. Dazu gehören inhomogene Strahlungsverteilungen oder Reflexionsverluste. Zusätzlich müssen optische Bauteile glatte Formen oft durch ebene Facetten approximieren (Abele 1998; Miron 1998). Diese technischen Randbedingungen führen zu Einbußen bei der Leistungsfähigkeit der Systeme, also zum Beispiel zu reduzierter Transmission. Diese Einbußen können mit Strahlverfolgungsrechnungen bestimmt werden und wurden bisher in der Regel in Kauf genommen.

Den einen zentralen und neuen Aspekt der vorliegenden Arbeit stellt deswegen die freie Optimierung der Form von Sekundärreflektoren dar. Die analytisch gefundenen Formen dienen als Ausgangspunkt eines Optimierungsprozesses. Unter realistischen technischen Rahmenbedingungen, wie endlicher Reflektivität der spiegelnden Oberflächen oder dem Aufbau eines Reflektors aus ebenen Facetten, wird die Leistungsfähigkeit einer Reflektorform mittels Strahlverfolgungsrechnungen ermittelt. Die Form wird in der Optimierung solange variiert, bis die Leistungsfähigkeit ein Optimum erreicht hat. Die optimalen Formen weichen oft signifikant von den analytisch gefundenen ab (s. Abschnitt 3.3).

Den zweiten Schwerpunkt dieser Arbeit stellen insbesondere neuartige asymmetrische Reflektorformen dar. Bisher wurden in der nichtabbildenden Optik meist translationsinvariante oder rotationssymmetrische Problemstellungen behandelt. Gerade die Strahlung im Fokus des Spiegelfeldes weist aber charakteristische Asymmetrien auf, denen konventionelle Formen nichtabbildender Sekundärreflektoren nicht gerecht werden können.





---

# 1 Strahlungstransfer in der geometrischen Optik

*In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen von Strahlungstransfer in der geometrischen Optik erläutert.*

*Die Basis der Beschreibung ist der vierdimensionale Phasenraum der geometrischen Optik. Das Phasenraumvolumen Etendue beschreibt die Ausdehnung im Orts- und Richtungsraum und ist eine Erhaltungsgröße. Die exakte Beschreibung im Phasenraum zeigt Möglichkeiten und Grenzen bei konkreten Problemstellungen auf.*

*Die nichtabbildende Optik beschreibt den Strahlungstransfer im Phasenraum ohne Einschränkung auf Ortsabbildung. Mit ihrer Hilfe können Möglichkeiten und Grenzen bei konkreten Problemstellungen aufgezeigt werden.*

*Eine Standardaufgabenstellung in der nichtabbildenden Optik ist die Konzentration von Strahlung, die Erhöhung der Bestrahlungsstärke, möglichst nahe an den physikalischen Grenzwert. Mit Methoden wie dem Maßschneidern nach Randstrahlen kann diese Aufgabe in konkreten Fällen gelöst werden.*

*Diese analytischen Methoden können jedoch nicht in allen Fällen angewandt werden und berücksichtigen praktische Einschränkungen oder Materialeigenschaften nicht. Mit Strahlverfolgungsrechnungen kann die Leistungsfähigkeit eines optischen Systems berechnet werden.*

*Analytisch gefundene Entwürfe können so unter Berücksichtigung von realistischen Rahmenbedingungen variiert und ihre Leistungsfähigkeit in einem Optimierungsprozeß maximiert werden.*

## 1.1 Phasenraum und Konzentration

### 1.1.1 Der Phasenraum der geometrischen Optik

Im Rahmen der geometrischen Optik wird Lichtstrahlung als Bündel von Strahlen beschrieben. Ein einzelner Strahl im Raum wird durch eine Gerade idealisiert, charakterisiert durch einen Punkt und einen Richtungsvektor. Zur vollständigen Beschreibung bezieht man sich auf eine Referenzfläche, die von allen Strahlen des Bündels genau einmal geschnitten wird. Die zwei Ortskoordinaten des Schnittpunktes im System der Referenzfläche und die zwei Koordinaten der Projektion des Richtungsvektors auf die Referenzfläche spannen einen vierdimensionalen Phasenraum auf (s. Abbildung 1-1) (Welford 1989). Der vollständige Phasenraum der geometrischen Optik hat zusätzlich noch eine spektrale

und eine zeitliche Komponente (Landau 1964; Ries 1982). Da spektrale oder zeitliche Änderungen hier nicht betrachtet werden, gilt im weiteren die Einschränkung auf den vierdimensionalen geometrischen Unterraum.

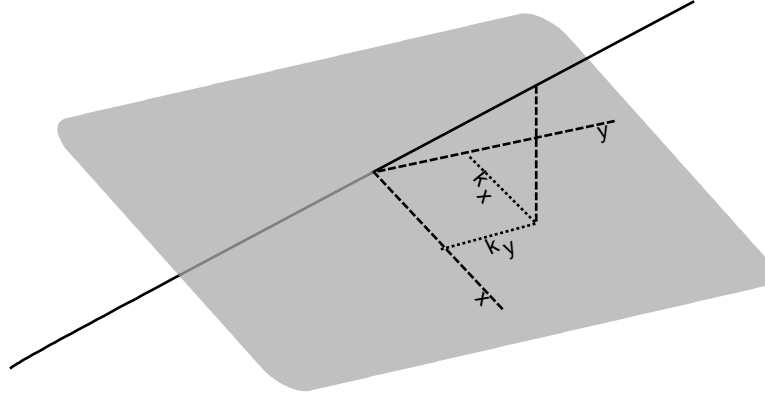


Abbildung 1-1: Charakterisierung eines Strahles im Raum mittels einer Referenzfläche. Der Strahl (schwarze Linie) schneidet die Referenzfläche (graue Ebene) in einem Punkt, der durch die  $x$ - und  $y$ -Koordinaten in der Fläche eindeutig festgelegt ist. Die Richtung des Strahles wird durch die Projektion des Einheits-Richtungsvektors des Strahles in die Referenzfläche mit den Komponenten  $k_x$  und  $k_y$  eindeutig festgelegt.

Das Volumen in diesem Phasenraum wird als Etendue  $\mathcal{E}$  bezeichnet. Das Volumenelement ist definiert als:

$$d\mathcal{E} = n^2 \cdot dk_x \cdot dk_y \cdot dx \cdot dy = n^2 \cdot d\vec{\Omega} \cdot d\vec{A} = n^2 \cdot d\Omega^* \cdot dA \quad (1.1)$$

Hierbei ist  $n$  der Brechungsindex des Mediums in dem sich der Strahl befindet. Das Produkt aus  $dk_x$  und  $dk_y$  wird auch als projiziertes Raumwinkелеlement  $d\Omega^*$  bezeichnet, da es die Projektion des gerichteten Raumwinkелеlements  $d\vec{\Omega}$  auf das gerichtete Flächenelement  $d\vec{A}$  darstellt (Welford 1989; Born 1993). Ein Punkt im Phasenraum wird im weiteren mit vierdimensionalen Vektor  $\vec{\mathcal{X}}$  und ein Gebiet im Phasenraum mit  $\mathcal{X}$  bezeichnet.

Die Strahldichte  $L$  ist als der Strahlungsfluß  $\Phi$  pro Phasenraumvolumen definiert. Der Strahlungsfluß hat die Dimension einer Leistung.

$$L = d\Phi/d\mathcal{E}. \quad (1.2)$$

Dementsprechend ist der gesamte Strahlungsfluß  $\Phi$  eines Strahlenbündels, das das Gebiet  $\mathcal{X}$  im Phasenraum ausfüllt:

$$\Phi = \int_{\mathcal{X}} L(\vec{\mathcal{X}}) d\mathcal{E}. \quad (1.3)$$

Die Bestrahlungsstärke  $E$  ist der Strahlungsfluß durch ein Flächenelement. Die Strahldichte wird über den gesamten Richtungshalbraum integriert:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \int_{\pi} L(\overline{\mathcal{X}}) d\Omega^* . \quad (1.4)$$

Die Strahlstärke  $I$  ist der Strahlungsfluß aus einem projizierten Raumwinkel-element. Die Strahldichte wird über die gesamte Fläche integriert:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega^*} = \int_A L(\overline{\mathcal{X}}) dA . \quad (1.5)$$

Eine weitergehende Beschreibung der fotometrischen Größen im Rahmen der geometrischen Optik ist in (Born 1993) zu finden.

Es ist leicht ersichtlich, daß die Wahl der Referenzfläche die Form des Gebietes beeinflußt, das eine bestimmte betrachtete Strahlung im Phasenraum einnimmt. Das Etendue der Strahlung ist jedoch unabhängig von der Wahl der Referenzfläche (Welford 1989). Das Etendue ist eine Erhaltungsgröße unter allen Transformationen, bei denen keine Strahlaufspaltung oder Strahlaufweitung vorkommt (Welford 1989; Born 1993). Dies ist der Fall bei idealer Reflexion oder Brechung mit idealer Transmission. Für die folgenden Betrachtungen wird von optischen Systemen ausgegangen, die das Etendue der Strahlung, die sie passiert, erhalten.

Bei translationsinvarianten Anordnungen ist es oft ausreichend, die Strahlung innerhalb einer Ebene senkrecht zur Translationsrichtung zu betrachten. Man spricht hierbei von zweidimensionalen Anordnungen. Ein Beispiel für zweidimensionale Problemstellungen ist die Beleuchtung mit lang ausgedehnten Leuchtstoffröhren. Reflektoren hierfür werden im allgemeinen rinnenförmig, also nur im Schnitt senkrecht zur Röhrenachse entworfen. In diesem Fall reichen zur Beschreibung eines Strahles der Ort auf einer Referenzlinie  $x$  und die Projektion seiner Richtung auf diese Linie  $k_x$  aus. Diese beiden Komponenten spannen den zweidimensionalen Phasenraum der zweidimensionalen Optik auf. Das Volumenelement ist dann:

$$d\mathcal{E}^{2D} = n \cdot dk_x \cdot dx \quad (1.6)$$

Abbildung 1-2 zeigt ein Beispiel für Strahlung im zweidimensionalen Raum und ihre Repräsentation im Phasenraum.

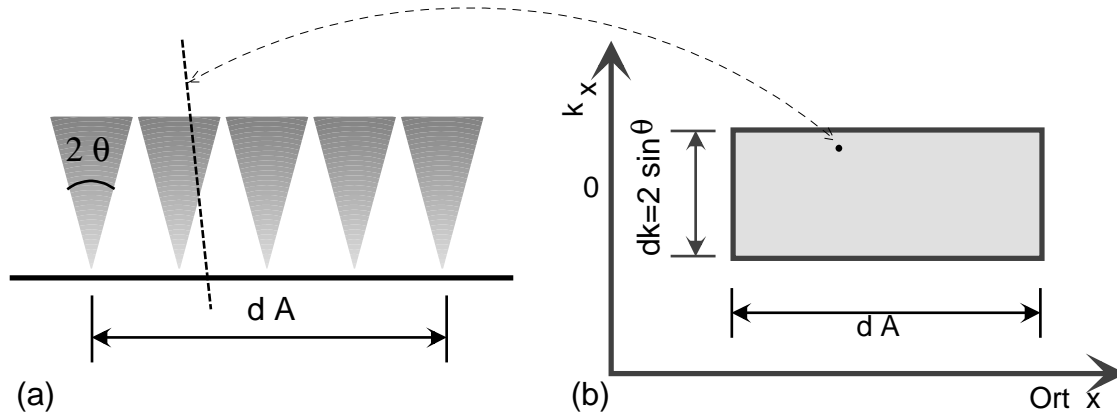


Abbildung 1-2: (a) Strahlen im zweidimensionalen physikalischen Raum. Die Strahlen fallen auf dem Abschnitt  $dA$  der schwarz gezeichneten Referenzlinie unter einem Winkel von  $\pm \theta$  zur Normalen der Referenzlinie ein. Der exemplarisch eingezeichnete Strahl (gestrichelte Linie) schneidet die Referenzlinie bei ca.  $1/3$  von  $dA$  und kommt aus einem Winkel, der etwas kleiner ist als der maximale Winkel  $\theta$ . (b) Im Phasenraum füllt die Strahlung ein Rechteck, daß sich in der örtlichen Dimension über  $dA$  und in der  $k_x$ -Dimension von  $-\sin\theta$  bis  $\sin\theta$  erstreckt.

### 1.1.2 Die Schiefe in drei Dimensionen

Dreidimensionale optische Systeme sind oft rotationssymmetrisch um eine optische Achse aufgebaut. In diesem Fall ist die Schiefe  $\mathcal{S}$  eines Strahles ebenfalls eine Erhaltungsgröße (Welford 1989):

$$\mathcal{S} = \vec{a} \cdot (\vec{p} \times n \cdot \vec{r}). \quad (1.7)$$

Hierbei ist  $\vec{a}$  der Richtungsvektor der optischen Achse,  $\vec{p}$  der Ortsvektor eines Punktes auf dem Strahl und  $\vec{r}$  der Richtungsvektor des Strahles. Die Schiefe bildet damit ein Analogon zum Bahndrehimpuls eines Teilchens in der Mechanik.

Da die Schiefe jedes Strahles in einem Rotationssymmetrischen optischen System erhalten ist, ist auch die Schiefeverteilung  $d\mathcal{S}/d\Omega$  für ein Strahlenbündel erhalten (Welford 1989; Bortz 1997; Ries 1997; Ries 1997). Wenn nun ein optisches System entworfen werden soll, das Strahlung von einer Quelle auf ein Ziel überträgt, muß zweierlei beachtet werden. Das Etendue der Zielstrahlung darf nicht kleiner sein als das Etendue der Quellstrahlung, weil sonst Strahlung verloren ginge. Genauso müssen im Falle eines rotationssymmetrischen Systems aber auch die Schiefeverteilungen von Quell- und Zielstrahlung zueinander passen. Die Überführung einer Schiefeverteilung in eine andere ist nur unter Brechung der Rotationssymmetrie möglich (Shatz 1997).

### 1.1.3 Konzentration von Strahlung

Folgende Aufgabenstellung ist ein grundlegendes und häufiges Problem in der geometrischen Optik: Strahlung, die auf einer gegebenen Fläche  $A$  auftrifft und ein gegebenes Etendue  $\mathcal{E}$  ausfüllt (die Quelle), soll verlustfrei auf eine Zielfläche  $A'$  übertragen werden. Der Strahlungsfluß auf  $A$  sei  $\Phi$ . Die Zielfläche  $A'$  soll möglichst klein werden, die Bestrahlungsstärke zwischen  $A$  und  $A'$  also so weit wie möglich erhöht werden. Hohe Bestrahlungsstärken erhöhen den erreichbaren Wirkungsgrad bei der thermischen Nutzung von Solarstrahlung, indem sie die Prozeßtemperatur erhöhen und Abstrahlungsverluste verringern oder das Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei Strahlungsdetektoren (Hinterberger 1966; Rabl 1985; Ouelette 1992) verbessern.

Um eine minimale räumliche Ausdehnung  $A'$  zu erzielen, muß die Strahlung die maximale Ausdehnung im projizierten Raumwinkel  $\Omega^*$  erreichen, da das Etendue  $\mathcal{E}$  der Strahlung als Produkt von beiden erhalten bleibt. Der projizierte Raumwinkel kann maximal den Wert von  $\pi$  annehmen, was dann bedeutet, daß die Strahlung aus dem vollen Halbraum auf  $A'$  einfällt. Dementsprechend ist die minimale Fläche  $A'_{\min}$ , durch die die Strahlung mit dem Etendue  $\mathcal{E}$  treten kann:

$$A'_{\min} = \mathcal{E} / (\pi \cdot n^2) . \quad (1.8)$$

Das Verhältnis der Bestrahlungsstärken  $E$  und  $E'$  auf den Flächen  $A$  und  $A'$  wird als Konzentration  $C$  bezeichnet (Welford 1989):

$$C = E' / E . \quad (1.9)$$

Die maximal erreichbare Konzentration  $C_{\max}$  ist im betrachteten Fall also:

$$C_{\max} = \frac{E'_{\max}}{E} = \frac{\Phi / A'_{\min}}{\Phi / A} = \frac{A \cdot \pi \cdot n^2}{\mathcal{E}} . \quad (1.10)$$

Dies gilt aber nur unter der Bedingung, daß alle einfallende Strahlung auf das Ziel übertragen wird. Bei nicht konstanter Strahldichte  $L(\overline{\mathcal{X}}) \leq L_{\max}$  der einfallenden Strahlung kann man eine höhere Konzentration erreichen, wenn man nur Strahlung mit relativ hoher Strahldichte einbezieht und Strahlung mit niedrigerer Strahldichte verwirft (Minano 1983). In diesem Falle gilt:

$$C_{\max} = \frac{E'_{\max}}{E} = \frac{L_{\max} \cdot \mathcal{E} / A'_{\min}}{\Phi / A} = \frac{L_{\max} \cdot A \cdot \pi \cdot n^2}{\int_{\mathcal{X}} L(\overline{\mathcal{X}}) d\mathcal{E}} . \quad (1.11)$$

Wenn für einen Teil der Strahlung gilt  $L(\overline{\mathcal{X}}) \neq L_{\max}$ , ist  $C_{\max}$  nur zu erreichen, wenn dieser Teil der Strahlung nicht zum Ziel übertragen wird. Das Verhältnis zwischen dem Strahlungsfluß  $\Phi'$  auf  $A'$  und dem einfallenden Strahlungsfluß  $\Phi$  wird als Transmission  $\tau$  bezeichnet:

$$\tau = \Phi' / \Phi. \quad (1.12)$$

Da man im Falle von ungleichmäßiger Strahldichtevertelung  $L(\overline{\mathcal{X}})$  also entweder eine hohe Transmission  $\tau$  oder eine hohe Konzentration  $C$  erreichen kann, aber nicht  $\tau=1$  und  $C=C_{\max}$  zugleich, trägt man die erreichbaren Werte sinnvollerweise in einer Kennlinie gegeneinander auf (Spirkl 1997; Spirkl 1997). Die Konzentration wird auch relativ zum Maximum aufgetragen:

$$C_{rel} = C / C_{\max}. \quad (1.13)$$

Diese Kennlinien kann man berechnen, indem man für jeden Wert der Strahldichte  $L_T$  zwischen  $L_T=0$  und  $L_T=L_{\max}$  die maximal erreichbare Konzentration  $C_T$  und die zugehörige Transmission  $\tau_T$  berechnet. Sei  $\mathcal{E}_T$  das Eten-due der Strahlung, für die gilt:

$$L(\overline{\mathcal{X}}) \geq L_T. \quad (1.14)$$

Diese Strahlung fülle das Gebiet  $\mathcal{X}_T$  im Phasenraum aus und trage den Strahlungsfluß  $\Phi_T$ . Dann gilt:

$$C_T = \frac{\Phi_T}{A'_{\min}(\mathcal{E}_T)} = \frac{\int_{\mathcal{X}_T} L(\overline{\mathcal{X}}) d\mathcal{E}}{\mathcal{E}_T / (\pi \cdot n^2)}, \quad (1.15)$$

und:

$$\tau_T = \frac{\Phi_T}{\Phi} = \frac{\int_{\mathcal{X}_T} L(\overline{\mathcal{X}}) d\mathcal{E}}{\Phi}. \quad (1.16)$$

Abbildung 1-3 zeigt resultierende Kennlinien für konstante und ungleich-mäßige Strahldichtevertelung  $L(\overline{\mathcal{X}})$ . Während man bei konstanter Strahldichte-vertelung  $L(\overline{\mathcal{X}})$  das Maximum der Konzentration bei vollständiger Transmission erreicht (gestrichelte Linie), gelingt dieses bei ungleichmäßiger Strahldichte-vertelung nicht. Die gepunktete Linie wurde für Strahlung berechnet, die im Rich-tungsraum eine Gauss-förmige Strahldichtevertelung auszeichnet.

Die so berechneten Kennlinien stellen die thermodynamisch begründete Obergrenze dar, die man mit einem optischen System erreichen kann. Es werden keinerlei Verluste berücksichtigt. Sie geben somit die maximal erreichbare Transmission für gegebene Konzentration und auch die maximale Konzentration für gegebene Transmission an. Die Kennlinien für realisierbare Bauteile werden immer unterhalb dieser Kennlinien bleiben, da hier zusätzlich noch Verluste auftreten, die sowohl die Transmission als auch die Konzentration verringern.

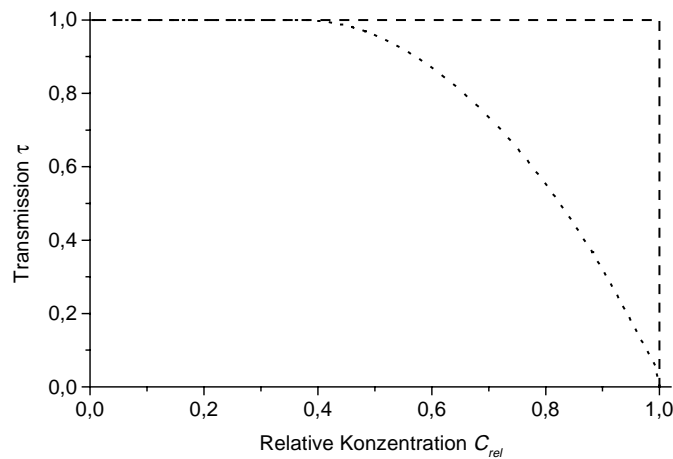


Abbildung 1-3: Kennlinien für die Konzentration von Strahlung stellen die erreichbare Transmission bei gegebener Konzentration dar. Es sind Kennlinien für gleichmäßige (gestrichelte Linie) und eine ungleichmäßige (gepunktete Linie) Strahldichteverteilung  $L(\vec{x})$  dargestellt.  $L(\vec{x})$  weist hier eine rotationssymmetrische Gauss-förmige Verteilung im Richtungsraum auf.

Beim Betrachten der Kennlinien in Abbildung 1-3 wird klar, daß es im Falle von ungleichmäßiger Strahldichteverteilung  $L(\vec{x})$  keine eindeutige Definition eines ideal konzentrierenden Systems geben kann, da man immer Transmission gegen Konzentration abwägen muß. Für die meisten Entwürfe wird jedoch von einer gleichmäßigen Strahldichteverteilung ausgegangen. Deswegen wird im folgenden ein optisches System, das eine gegebene Strahlung auf die minimale Fläche  $A'_{\min}$  nach Gleichung ( 1.3 ) überträgt, als idealer Konzentrator für diese Strahlung bezeichnet. Anzumerken bleibt, daß allein aus Gründen der Eten- dueerhaltung jeder Konzentrator für eine spezifische Einstrahlung ideal ist. Diese Strahlung läßt sich ermitteln, indem man den Strahlweg umkehrt. Wenn man eine diffus leuchtende Lichtquelle in die Austrittsapertur eines Konzen- trators bringt, erzeugt diese auf dessen Eintrittsapertur genau die Strahlung, die, wenn man ihre Richtung umkehrt, genau wieder die Austrittsapertur diffus aus- leuchten würde (Timinger 1998). Diese Einstrahlung stimmt jedoch im allgemei- nen nicht mit der Einstrahlung überein, für die der Konzentrator konzipiert ist.

Das Prinzip der Umkehr des Strahlweges bildet die Grundlage einer im Rahmen dieser Arbeit entwickelten optischen Meßmethode zur Charakterisierung von nichtabbildenden Reflektoren (s. Abschnitt 4.2).

## 1.2 Nichtabbildende Optik

Um Strahlung von einer Fläche auf eine andere zu übertragen, ist es nicht notwendig, jeden Punkt der einen Fläche auf die andere abzubilden. In der nichtabbildenden Optik befaßt man sich mit Grundlagen und Methoden von geometrischer Optik für Strahlungstransfer ohne Einschränkung auf Punkt-zu-Punkt-Abbildung. Abbildung 1-4 zeigt das Prinzip der Abbildung im Phasenraum der zweidimensionalen Optik. Strahlen von einem Ort auf der Quelle werden auf einen Ort auf dem Ziel übertragen. Diese Einschränkung gilt nicht für die nichtabbildende Optik, wie in Abbildung 1-5 gezeigt ist. Die nichtabbildende Optik behandelt die physikalischen Aspekte von Strahlungstransfer von einem Gebiet im Phasenraum in ein anderes und liefert analytische Methoden zum Entwurf von optischen Bauelementen.

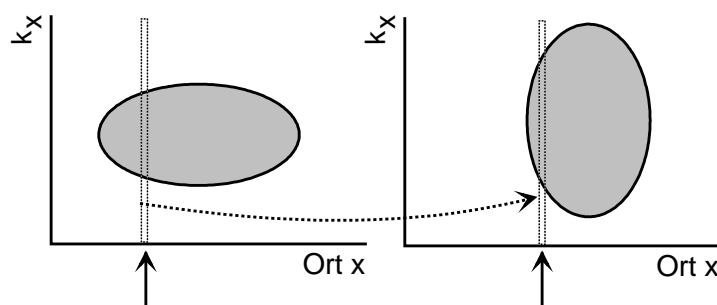


Abbildung 1-4: Abbildende Optik im zweidimensionalen Phasenraum. Strahlen von einem Ort auf der Quelle (Pfeil links) werden auf einen Punkt auf dem Ziel (Pfeil rechts) übertragen.

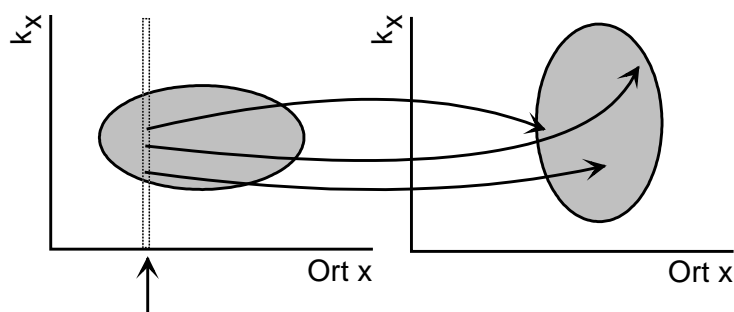


Abbildung 1-5: Nichtabbildende Optik im zweidimensionalen Phasenraum. Strahlen von einem Ort auf der Quelle (Pfeil links) werden auf verschiedene Orte auf dem Ziel (rechts) übertragen.



Es ist leicht einzusehen, daß der Verzicht auf abbildende Eigenschaften neue Freiheitsgrade bei der Gestaltung von optischen Systemen bietet.

Im folgenden wird kurz skizziert, warum abbildende Systeme nicht die maximale Konzentration erreichen können, wenn sie mit Aberrationen behaftet sind. Wenn man Strahlung auf eine Zielfläche mit der minimalen Ausdehnung nach Gleichung ( 1.3 ) mit einem abbildenden System übertragen, also einen idealen abbildenden Konzentrador entwerfen will, muß man den Rand der Quelle auf den Rand der Zielfläche abbilden. Um keine Strahlung zu verlieren, darf das abbildende System keine Aberrationen haben, da sonst Strahlung über den Rand der minimalen Zielfläche hinaus ‚leckt‘. Allein aus Gründen der Etendueerhaltung können die Aberrationen die Strahlung auf dem Rand nicht nur zum Bild hin abweichen lassen. Gleichzeitig kommt in diesem Fall die Strahlung auf jedem Punkt der Zielfläche aus dem gesamten Halbraum. Ein abbildendes System müßte also aberrationsfrei mit einer numerischen Apertur von 1 abbilden. Eine aberrationsfreie Abbildung von ausgedehnten Bildern über ausgedehnte Strahlenbündel ist jedoch nicht möglich (Hundt 1963; Landau 1964).

Mit Hilfe der Prinzipien der nichtabbildenden Optik ist es in vielen Fällen möglich, optische Systeme zu entwerfen, die Strahlung vollständig auf die minimale Fläche zu konzentrieren. Im folgenden Abschnitt wird eines dieser Prinzipien näher erläutert.

### **1.2.1 Das Randstrahlenprinzip**

Um Strahlung aus einem Gebiet im Phasenraum vollständig in ein anderes zu übertragen, reicht es aus zu gewährleisten, daß alle Strahlung vom Rand des einen Gebietes im Phasenraum auf den Rand des anderen Gebietes übertragen wird. Hierbei kann auch noch ein weiteres Gebiet als Hilfsmenge hinzugezogen werden. Dieses sogenannte Randstrahlenprinzip kann man aus den topologischen Eigenschaften der optischen Transferfunktion im Phasenraum der geometrischen Optik herleiten (Welford 1989; Ries 1994). Abbildung 1-6 veranschaulicht das Randstrahlenprinzip im zweidimensionalen Phasenraum.

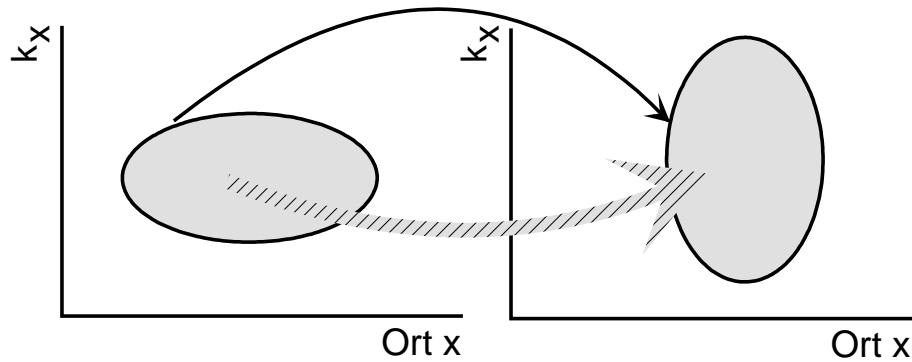


Abbildung 1-6: Das Randstrahlenprinzip der nichtabbildenden Optik. Um Strahlung aus einem Gebiet im Phasenraum in ein anderes zu übertragen (grauer Pfeil), reicht es aus, sicherzustellen, daß der Rand des einen Gebietes auf den Rand des anderen Gebietes übertragen wird (schwarzer Pfeil).

Das Randstrahlenprinzip liefert auch eine Vorschrift zum Entwurf von neuen optischen Systemen. Bei zweidimensionalen Problemstellungen sind die Randstrahlen eines kompakten Gebietes im Phasenraum eine eindimensionale Mannigfaltigkeit, wie zum Beispiel der durch eine schwarze Linie gekennzeichnete Rand der Menge in Abbildung 1-6. Man kann die Randstrahlen von Quell- und Zielstrahlung parameterisieren und eine Rechenvorschrift entwickeln, die beide Mengen aufeinander abbildet. Abbildung 1-7 veranschaulicht dieses sogenannte Maßschneidern nach Randstrahlen (Friedman 1993; Gordon 1993; Ries 1994; Ong 1995; Friedman 1996; Friedman 1996; Jenkins 1996; Tschudi 1996).

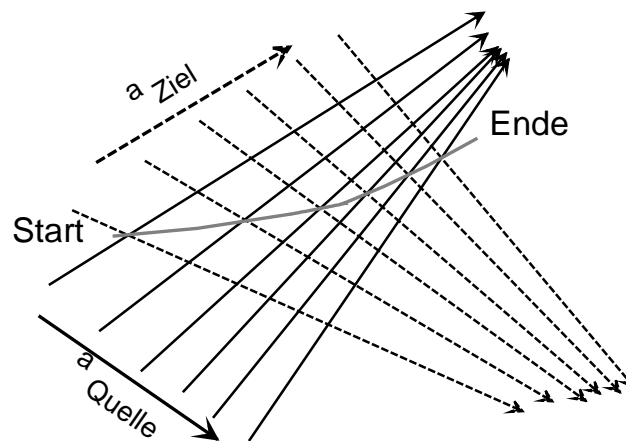


Abbildung 1-7: Maßschneidern nach Randstrahlen. Der Reflektor (graue Linie) reflektiert an jeder Stelle einen Randstrahl von der Quelle (durchgezogen) in einen Randstrahl des Zieles (gestrichelt). Die Parameter  $a_{\text{Quelle}}$  und  $a_{\text{Ziel}}$  parameterisieren die Randstrahlen von Quelle und Ziel.

Die Parameter  $a_{\text{Quelle}}$  und  $a_{\text{Ziel}}$  parameterisieren die Phasenraumrandstrahlen von Quelle (durchgezogen) und Ziel (gestrichelt). Man beginnt mit dem Reflektor

(graue Linie) an einem geeigneten Startpunkt. An diesem Punkt müssen sich je ein Randstrahl von Quelle und Ziel schneiden. Der Reflektor ist an dieser Stelle so geneigt, daß er den Quell-Strahl in den Ziel-Strahl reflektiert. Mit einer Rechenvorschrift werden dann die nächsten zwei Strahlen gefunden, an deren Schnittpunkt der Reflektor fortgesetzt werden kann. Die Rechenvorschrift sorgt dafür, daß die Parameter  $a_{\text{Quelle}}$  und  $a_{\text{Ziel}}$  ihren vollen Wertebereich durchlaufen, also alle Randstrahlen von Quelle und Ziel berücksichtigt werden, und daß der resultierende Reflektor stetig ist.

Der große Vorteil des Maßschneiderns liegt darin, daß man nur die Menge der Randstrahlen für den Entwurf des optischen Systems zu berücksichtigen braucht, aber trotzdem die gesamte Strahlung im Phasenraumvolumen übertragen wird. Das Maßschneidern stößt an Grenzen, wenn mehr als ein Randstrahl von Quelle oder Ziel den Reflektor an derselben Stelle schneiden. Bei zweidimensionalen Problemstellungen kann diese Situation im allgemeinen durch die Wahl eines geeigneten Startpunktes vermieden werden. Bei dreidimensionalen Problemstellungen ist sie jedoch unvermeidbar. Nur in Ausnahmefällen können dann alle einfallenden Quell-Randstrahlen mit einem Reflektorelement in Ziel-Randstrahlen übertragen werden (Friedman 1993; Ong 1995).

### 1.2.2 Einige nichtabbildende Reflektorformen

Der bekannteste nichtabbildende Reflektor zur Konzentration von Strahlung ist der 'Compound Parabolic Concentrator', im weiteren CPC-Reflektor genannt (Rabl 1976; Rabl 1985; Welford 1989). Er ist für Strahlung konzipiert, die über die ganze Eintrittsapertur aus einem gleichmäßigen Richtungsbereich einfällt. Dieser erstreckt sich von  $-\theta$  bis  $\theta$  zur Normalen auf der Apertur. Abbildung 1-8 (a) zeigt diese Strahlung in zwei Dimensionen im physikalischen Raum und Abbildung 1-2 auch im Phasenraum. Der CPC-Reflektor ist aus zwei Parabelästen zusammengesetzt. Jeder Ast reflektiert die Strahlen, die aus einer der extremen Richtungen kommen auf den gegenüberliegenden Rand der Austrittsapertur (Abbildung 1-8 (b)). Damit überträgt der CPC-Reflektor die Strahlen vom Richtungsrand auf der Eintrittsapertur auf den Ortsrand der Austrittsapertur (Welford 1989). Dies sind aber nicht alle Randstrahlen im Phasenraum, der CPC-Reflektor überträgt auch nicht den gesamten Rand der Quellstrahlung im Phasenraum auf den Rand der Strahlung auf der Austrittsapertur. Erst mit dem verallgemeinerten Randstrahlenprinzip, das zusätzlich zu Quelle und Ziel noch Hilfsmengen im Phasenraum einbezieht, konnte gezeigt werden, daß der CPC-Reflektor in zwei Dimensionen ein idealer Konzentrator für die beschriebene Strahlung ist (Ries 1994).

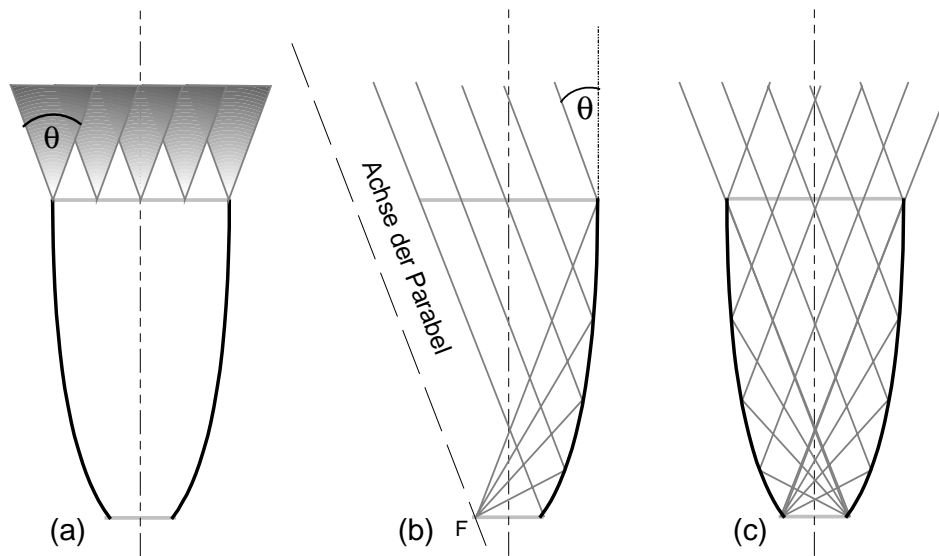


Abbildung 1-8: Der zweidimensionale CPC-Reflektor. (a) Die Strahlung fällt auf die ganze Eintrittsapertur aus einem konstanten Winkelbereich symmetrisch um die optische Achse ein. Der Öffnungswinkel der Strahlung ist  $2\theta$ . (b) (c) Jeder Ast des Reflektors hat die Form einer Parabel. Die Strahlung aus der einer extremen Richtung wird auf den Brennpunkt F an der gegenüberliegenden Seite der Austrittsapertur reflektiert.

Der dreidimensionale CPC-Reflektor geht aus dem zweidimensionalen durch Rotation um die optische Achse hervor (Welford 1989). Er ist für Strahlung konzipiert, die aus einem Richtungskegel auf die Eintrittsapertur einfällt. Diese Strahlung kann er aber nicht mehr vollständig auf die Austrittsapertur übertragen. Ein Teil der Strahlen, die unter Winkeln nahe dem nominellen Öffnungswinkel  $\theta$  zur Normalen auf die Eintrittsapertur einfallen, erreichen nicht die Austrittsapertur. Sie werden im Reflektor umgekehrt und verlassen ihn wieder durch die Eintrittsapertur. Im Gegenzug erreicht ein Teil der Strahlung außerhalb der nominellen Einstrahlung die Austrittsapertur. Der dreidimensionale CPC-Reflektor ist also kein idealer Konzentrator für die Strahlung, für die er entworfen ist. Eine sehr detaillierte Behandlung des dreidimensionalen CPC-Reflektors ist bei (Welford 1989) und (Rabl 1976) zu finden.

Bekannte ideale Konzentratoren für Strahlung aus einem kompakten Gebiet im Phasenraum in drei Dimensionen sind der Konus und die Trompete, ein Rotationshyperboloid (Rabl 1976; O'Gallagher 1987; Welford 1989; Ries 1995). Die Strahlung, die der Konus akzeptiert geht in die Strahlung über, für die der CPC-Reflektor entworfen ist, wenn man den Konus entlang seiner optischen Achse unendlich lang ausdehnt (Schöffel 1995). Ein unendlich langer Konus wäre also ein idealer Konzentrator für die Strahlung, für die der dreidimensionale CPC-Reflektor konzipiert ist.

### 1.2.3 Grenzen der analytischen Methoden

Die analytischen Methoden der nichtabbildenden Optik zum Entwerfen von optischen Systemen, wie zum Beispiel das oben beschriebene Maßschneidern nach Randstrahlen oder die Vektorflußmethode (Winston 1979; Winston 1997) können unter bestimmten Bedingungen den Entwurf eines idealen Konzentratoren ermöglichen. Der praktische Nutzen ist aber einigen Einschränkungen unterworfen:

- Beim Maßschneidern nach Randstrahlen ist eine Bedingung, daß auf jedem Punkt des Reflektors jeweils ein Randstrahl der Quelle auf einen Randstrahl des Zieles abgebildet wird. Treffen mehrere Randstrahlen von Quelle oder Ziel auf denselben Ort am Reflektor, kann dessen Neigung in den meisten Fällen nicht mehr eindeutig festgelegt werden. Diese Problematik kann bei zweidimensionalen Problemstellungen auftauchen, ist bei dreidimensionalen Problemstellungen aber unvermeidbar.
- Die Form des optischen Systems ist aufgrund des schrittweisen Vorgehens oft nicht im voraus einzuschätzen. Beim Maßschneidern nach Randstrahlen kann sie zum Beispiel stark von der Lage der Zielfläche und der Wahl des Startpunktes abhängen (Ong 1995).
- Äußere Randbedingungen, wie zum Beispiel die Einschränkung der Größe des Systems, können nicht berücksichtigt werden.
- Die Methoden implizieren grundsätzlich ideale optische Eigenschaften, wie zum Beispiel perfekte Reflektivität. Reflexionsverluste durch Mehrfachreflexionen oder Oberflächenfehler können dann zu Einbußen bei realisierten Systemen führen.
- Die analytischen Methoden sind nur dazu geeignet, die gesamte Strahlung von der Quelle auf ein Ziel minimaler Ausdehnung zu übertragen. Eine Reduktion der Transmission zur Steigerung der Konzentration bei ungleichmäßiger Strahldichtevertelung, wie sie in Abschnitt 1.1.2 beschrieben ist, ist nicht explizit vorgesehen. Hierfür muß man im vorhinein die Strahlung gemäß ihrer Strahldichte auswählen.
- Insbesondere mittels Maßschneidern entworfene Reflektoren tendieren in vielen Fällen dazu, sich vom Rand der Quelle bis zum Rand des Zieles zu erstrecken, also den gesamten Zwischenraum einzuschließen (Gordon 1993; Spirkel 1997). Wenn die Quelle eine von außen beleuchtete Fläche ist, zum Beispiel ein von der Sonne beschienenes Heliostatenfeld, wie es in Abschnitt 1 beschrieben ist, verschattet der Reflektor dann die gesamte Quelle.

### 1.3 Strahlverfolgung und Optimierung

Im letzten Abschnitt wurde skizziert, warum die analytischen Methoden der nichtabbildenden Optik nicht immer direkt zu praxisgerechten Lösungen für optische Problemstellungen führen. Die Ergebnisse von analytischen Entwurfsmethoden können aber als sehr gute Grundlage für praktische Entwürfe dienen. So werden dreidimensionale Systeme aus zweidimensionalen Schnitten aufgebaut, innerhalb derer das Maßschneiden nach Randstrahlen angewandt werden kann. Insbesondere werden bei rotationssymmetrischen dreidimensionalen Problemstellungen zweidimensionale Lösungen gefunden und durch Rotation um die Symmetrieachse auf drei Dimensionen übertragen, wie es am Beispiel des dreidimensionalen CPC-Reflektors beschrieben wurde.

Man kann bei den so gefundenen dreidimensionalen Systemen oft den Strahlungstransfer nicht mehr mit den analytischen Methoden beschreiben, die zu den zweidimensionalen Systemen geführt haben. Da der analytische Zugang fehlt, muß man ihre Leistungsfähigkeit für die gestellte Aufgabe, zum Beispiel die Konzentration von Strahlung, experimentell ermitteln. Das ist selbstverständlich ebenso der Fall wenn man nicht perfekte optische Eigenschaften der verwendeten Materialien berücksichtigen will.

Anstelle von Laborexperimenten tritt hier in der geometrischen Optik oft die numerische Simulation, die sogenannte Strahlverfolgung (Rabl 1976; Welford 1989). Die wichtigsten Elemente sind die Wechselwirkungen von Lichtstrahlen mit brechenden, reflektierenden und absorbierenden Flächen. Hierbei können realistische optische Eigenschaften wie eingeschränkte Reflektivität oder Streuung berücksichtigt werden. Für die vorliegende Arbeit wurden sowohl eine kommerziell erhältliche Strahlverfolgungs-Software (BRO 1997) als auch im Rahmen des BMBF-Projektes selbst erstellte Programme verwendet.

Mit Strahlverfolgung kann man zeigen, daß der dreidimensionale CPC-Reflektor kein idealer Konzentrator ist wie der zweidimensionale CPC-Reflektor, aus dem er durch Rotation hervorgegangen ist. Er überträgt nicht die gesamte Strahlung, für die er vorgesehen ist, auf seine Austrittsapertur. Andererseits büßt aber auch ein idealer Konzentrator an Leistungsfähigkeit ein, wenn seine optischen Oberflächen nicht perfekt sind, sondern zum Beispiel Reflexionsverluste auftreten.

Wenn aber ein optisches System nicht ideal ist, also die gestellte Aufgabe nicht im vollen Maße erfüllt, kann man eventuell durch Variation seiner Form oder seines Aufbaus die Leistungsfähigkeit für die gestellte Aufgabe verbessern.

Die Variation der Form von optischen Systemen im Rahmen eines Optimierungsprozesses stellt einen wesentlichen Bestandteil dieser Arbeit dar.

Ausgangspunkt der Optimierung sind Grundformen, die mittels der analytischen Methoden der nichtabbildenden Optik gefunden werden. Diese Lösungen werden durch parametrisch bestimmte Formen angenähert und erweitert. Im Optimierungsprozeß werden dann die Parameter, die die Formen bestimmen, systematisch variiert und für jeden Parametersatz die Leistungsfähigkeit des Systems als Zielgröße der Optimierung mittels Strahlverfolgung berechnet. Das Ziel des Optimierungsprozesses ist die Maximierung der Leistungsfähigkeit. Wie sich diese Leistungsfähigkeit konkret berechnet, hängt von der jeweiligen Problemstellung ab. Oft wird als Zielgröße zum Beispiel die Transmission der Strahlung auf eine gegebene Austrittsaperturfläche verwendet.

Für die vorliegende Arbeit wurden zwei Optimierungsalgorithmen verwendet. In einer ersten Stufe wurde mit einer relativ geringen Zielgenauigkeit ein sogenannter Simulated Annealing Algorithmus eingesetzt, der den zur Verfügung stehenden Parameterraum sehr weitläufig durchläuft und dabei seine Schrittweite stetig verringert. Da dieser Algorithmus die Zielgröße verhältnismäßig oft berechnen muß, wurde dafür eine geringe Anzahl von Strahlen bei der Simulation verwendet. Dies verringert die Genauigkeit des Ergebnisses, die mit der Anzahl der Strahlen steigt (Davies 1992; Press 1992). In dieser ersten Stufe der Optimierung wird die globale Struktur des Parameterraums untersucht, ohne auf Feinheiten in der Zielgröße Rücksicht zu nehmen. Es soll ein Gebiet in der Nachbarschaft des Optimums gefunden werden.

In der zweiten Stufe der Optimierung wurde dann die lokale Struktur des Parameterraums untersucht. Hierzu wurde eine Konjugierte Gradienten Methode nach Powell verwendet, die Optima in der näheren Umgebung des Startpunktes zuverlässig und mit relativ wenigen Schritten findet. Es wurde dann eine größere Anzahl von Strahlen verwendet und damit die Genauigkeit des Ergebnisses gesteigert. Die statistischen relativen Fehler der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse sind geringer als ein Prozent. Die verwendeten Algorithmen sind in (Press 1992) näher beschrieben.

Bei der Parameterisierung der verwendeten Formen und während der Optimierung wurden die technischen und physikalischen Randbedingungen berücksichtigt. Dazu gehören zum Beispiel die Reflektivität der verwendeten Materialien und Beschränkungen in der Größe des Systems oder den Krümmungsradien von Glasmaterialien, wie sie für Spiegel verwendet werden. Die Einbeziehung solcher Randbedingung ist ein wesentliches Element der Optimierung und stellt einen großen Vorteil gegenüber bisherigen Methoden dar, bei denen

analytisch gefundene Systeme den Randbedingungen willkürlich angepaßt und die dadurch verursachten Einbußen in Kauf genommen wurden (s. Abschnitt 3.3 ).



---

## 2 Heliostatenfeld und Solarturmkraftwerk

*Das Solarturmkraftwerk ist ein Konzept zur thermischen Nutzung von Solarenergie in großem Maßstab. Das Sonnenlicht wird von einem großen Spiegelfeld in seinem Fokus an der Spitze eines Turmes gebündelt. Die Strahlung wird in einem Absorber an ein Arbeitsmedium übertragen. Das erhitzte Arbeitsmedium wird in einer Turbine entspannt und treibt darüber einen Generator an.*

*Die Strahlung kann im Fokus des Spiegelfeldes mit einem Sekundärreflektor noch weiter konzentriert werden. Mit höherer Konzentration erzielt man höhere Temperaturen im Arbeitsmedium, die wiederum effizientere Wärme-Kraft-Prozesse erlauben. Der Sekundärreflektor beeinflusst dann entscheidend den Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerkes. Mit ihm außerdem werden die Verluste durch Wärmestrahlung aus dem Absorber reduziert.*

*Das Spiegelfeld stellt die Strahlungsquelle für den Sekundärreflektor dar, dessen Optimierung diese Arbeit gewidmet ist. Seine spezifischen Eigenschaften prägen die Strahlungsverteilung auf der Eintrittsapertur im Orts- und Richtungsraum. Der zentrale Bereich der Apertur wird vom gesamten Heliostatenfeld beschienen, während die Randbereiche nur von den entfernten Teilen des Feldes beschienen werden.*

*Die Strahlungsenergie kann wesentlich effizienter in Arbeit umgesetzt werden, wenn man Strahlung mit verschiedener Bestrahlungsstärke nicht vermischt, sondern in getrennten Absorbern mit unterschiedlicher Arbeitstemperatur umsetzt. Schon die Unterteilung in zwei thermisch getrennte Stufen kann die erreichbare Austrittstemperatur des Arbeitsmediums deutlich erhöhen.*

### 2.1 Konzept des Solarturmkraftwerks

Das Solarturmkraftwerk ist ein solarthermisches Kraftwerkskonzept für elektrische Ausgangsleistungen im Bereich von einigen zehn bis einigen hundert Megawatt (Winter 1991; Kribus 1998). Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Entwurf und der Optimierung des Sekundärreflektors, eines optischen Elementes eines solchen Kraftwerkes.

In diesem Abschnitt werden der schematische Aufbau eines Solarturmkraftwerks dargelegt und die einzelnen Komponenten, insbesondere der optische Teil, erläutert. Außerdem werden die Wirkungsgrade und Verluste der einzelnen Komponenten des Kraftwerks skizziert.

### 2.1.1 Schematischer Aufbau

Der schematische Aufbau eines Solarturmkraftwerks mit Sekundärreflektor ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Die Sonnenstrahlung (1) wird von einem Feld einzeln nachgeführter Spiegel, den Heliostaten (2), in Richtung der Spitze des Turmes reflektiert (3). Die einfallende Strahlung kann von einem Sekundärreflektor (4) abermals konzentriert werden, an dessen Austrittsapertur der Absorber (5) ansetzt. Im Absorber wird die Strahlung absorbiert und als Wärme an ein Arbeitsmedium, zum Beispiel Luft, weitergegeben. Das erhitzte Arbeitsmedium wird in einer Turbine entspannt, die einen Generator zur Stromerzeugung (6) antreibt.

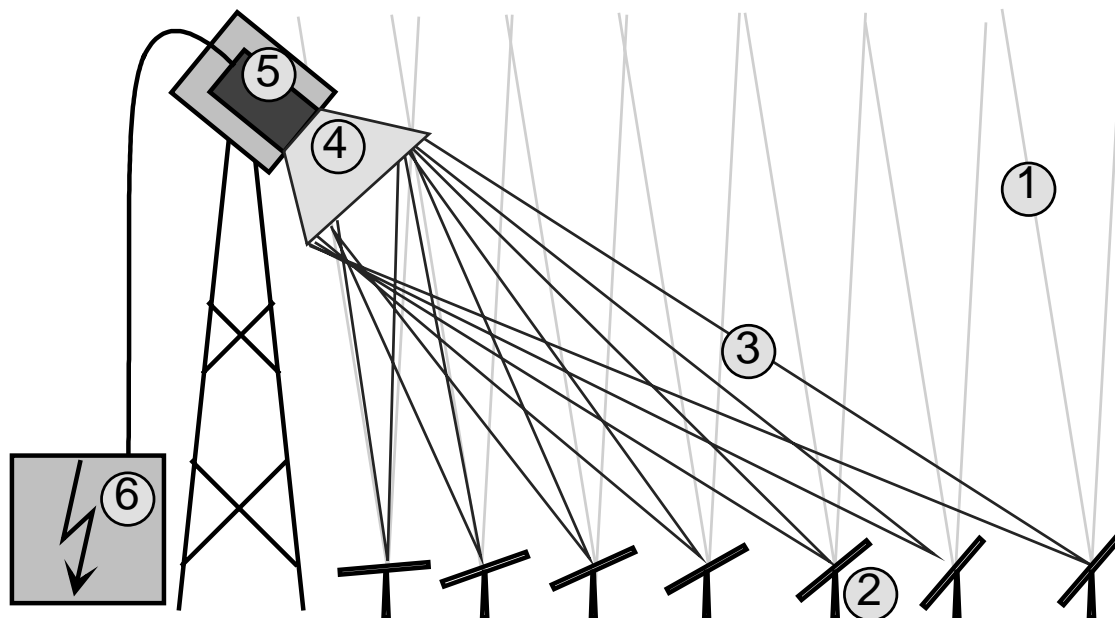


Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau eines Solarturmkraftwerkes. Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu. Insbesondere der Sekundärreflektor (4) und der Absorber (5) sind überproportional groß dargestellt.

### 2.1.2 Die einzelnen Komponenten

Die Strahlung von der Sonne (1)\* kommt aus einem Richtungskegel, dessen Öffnungswinkel vom Durchmesser der Sonne und deren Abstand zur Erde bestimmt wird. Dieser eigentlich scharf abgegrenzte Kegel wird jedoch durch die Streuung der Strahlung in der Atmosphäre aufgeweitet, so daß für die Richtungsabhängigkeit der Strahldichtevertelung keine scharfe Stufenfunktion mehr

\* Die Nummern in Klammer beziehen sich auf Abbildung 2-1.

verwendet werden kann. Gemessene Richtungsabhängigkeiten können durch Polynome oder eine Überlagerung mehrerer Gauss-Funktionen gut angenähert werden (Vittitoe 1981; Schubnell 1992). In aller Regel fallen über 90% der Strahlungsleistung innerhalb eines Kegels mit 5 *mrad* halben Öffnungswinkel. Die mittlere Bestrahlungsstärke auf einer Fläche senkrecht zur Sonnenstrahlung beträgt an für Solarturmkraftwerke relevanten Standorten zwischen 800  $W/m^2$  und 950  $W/m^2$ .

Die Heliostaten (2) sind einzeln der Sonne nachgeführte Spiegel. Sie reflektieren das Sonnenlicht in Richtung des Turms. Die spiegelnde Fläche hat näherungsweise die Form eines Paraboloids mit Brennpunkt auf der Eintrittsapertur des Sekundärreflektors. Bei modernen Heliostaten werden hierfür Glasspiegel auf eine vorgeformte Stahlmembran aufgebracht, die auf einem ringförmigen Rahmen gespannt ist. Diese runden sogenannten Stretched-Membrane-Heliostaten haben eine Spiegelfläche von 150  $m^2$  (Weinrebe 1996).

Das Feld von Heliostaten fokussiert die Sonnenstrahlung auf der Eintrittsapertur des Sekundärreflektors. Von jedem einzelnen Heliostaten geht dabei ein Strahlungskegel aus (3). Diesen zeichnet die oben beschriebene Richtungscharakteristik der direkten Sonnenstrahlung aus, die jedoch aufgrund von kleinen Fehlern in der Form der Heliostaten weiter aufgeweitet und geglättet wird. Diese Fehler resultieren vor allem aus der Zerlegung der Parabolform in Facetten und den Fertigungstoleranzen. Die Richtungsverteilung der von einem Heliostaten reflektierten Strahlung wird bei den im weiteren vorgestellten Simulationsrechnungen durch eine zweidimensionale Gaussverteilung angenähert. Auf diesem Weg lassen sich Simulationsrechnungen, die am Weizmann Institute of Science für einzelne Heliostaten unter der Berücksichtigung der Form und Ausrichtung jeder einzelnen Spiegelfacette erstellt wurden, gut reproduzieren.

Die Konzentration der Sonnenstrahlung im Fokus eines Heliostatenfeldes kann typischerweise einige Tausend betragen. Da die Strahlung jedoch nicht aus dem gesamten Halbraum auf die Fokalebene einfällt, kann sie noch weiter konzentriert werden. Hierfür kann ein nichtabbildender Reflektor, der sogenannte Sekundärreflektor (4) eingesetzt. Ob der Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerkes durch den Einsatz eines Sekundärreflektors gesteigert werden kann, ist vor allem von der Temperatur des verwendeten Wärme-Kraft-Prozesses abhängig (s.u.). Bisher konstruierte Sekundärreflektoren haben die Form eines CPC-Reflektors, die jedoch den technischen Rahmenbedingungen angepaßt wurde. Die Reflektoren sind in der Regel zu groß, um mit der analytischen, zweidimensional gekrümmten Oberfläche gefertigt zu werden. Außerdem werden oft rückseitig mit Silber beschichtete Glasspiegel verwendet. Aus diesen Gründen wird die CPC-Form

durch ebene Facetten, konische Ringe oder eindimensional parabolisch gekrümmte Segmente angenähert (Suresh 1990; O'Gallagher 1995; Abele 1998; Levy 1998; Miron 1998).

Die vorliegende Arbeit verfolgt im wesentlichen zwei Ziele. Einerseits werden die klassischen CPC-Formen durch Optimierung ihrer Form unter gegebenen Randbedingungen signifikant verbessert. Andererseits werden asymmetrische Formen von Sekundärreflektoren eingeführt, die für bestehende Heliostatenfelder eine deutliche Erhöhung der Konzentration bei gleicher Transmission im Vergleich zu symmetrischen Reflektoren erreichen.

Mit dem Absorber (5) endet der optische und beginnt der thermische Teil des Kraftwerks. Im Absorber wird die konzentrierte Solarstrahlung in Wärme umgesetzt und an ein Arbeitsmedium weitergegeben. Für die hier diskutierten Turmkraftwerke mit Sekundärreflektor wird in der Regel Luft als Arbeitsmedium verwendet, die unter hohem Druck auf Temperaturen zwischen 800°C und 1500°C erhitzt werden soll. Dies geschieht in sogenannten volumetrischen Absorbern. Die Strahlung tritt durch ein Fenster in einen Hohlraum ein und wird dort nicht auf einer zweidimensionalen Fläche absorbiert sondern dringt in eine dreidimensionale Struktur ein und wird in deren Volumen absorbiert. Diese Struktur kann als ein keramischer Schaum, ein Drahtgeflecht oder eine Anordnung von dicht beieinander stehenden Nadeln realisiert werden (Buck 1989; Leon 1996; Karni 1997; Buck 1998).

Wird komprimierte Luft als Arbeitsmedium verwendet, kann diese direkt in einer Gasturbine (6) entspannt werden. Beim Gas-und-Dampf-Prozeß wird die Abwärme der Gasturbine zur Erzeugung von überhitzten Wasserdampf benutzt, der wiederum in einer Dampfturbine entspannt wird. (Bohn 1995; Kribus 1998). Die Turbinen ihrerseits treiben Generatoren zur Stromerzeugung an.

Um Schwankungen in der Sonneneinstrahlung, wie sie zum Beispiel durch durchziehende Wolken verursacht werden können, auszugleichen, oder das Kraftwerk auch nachts betreiben zu können, ist bei solarthermischen Kraftwerken üblicherweise eine zusätzliche Gasfeuerung vorgesehen. Dieser gleichzeitige Betrieb der Anlage mit Solarenergie und fossiler Befeuerung wird als Hybridbetrieb bezeichnet.

Als Alternative zur Stromerzeugung wird ist auch die Produktion chemischer Energieträger in Solarturmkraftwerken diskutiert und erforscht. Im Gegensatz zu elektrischer Energie können solche Kraftstoffe auch über längere Zeiträume in großen Mengen gespeichert werden. Statt des oben beschriebenen Absorbers wird in diesem Fall ein chemischer Reaktor eingesetzt, in dem die Strahlung und die

absorbierte Wärme eine endotherme chemische Reaktion antreiben, in der ein Energieträger erzeugt wird. Beispiele hierfür sind die Methanreformierung (Buck 1991; Muir 1994; Abele 1996) oder die Reduzierung von Metalloxiden zu reinen Metallen (Steinfeld 1995; Steinfeld 1998).

### 2.1.3 Verluste und Gesamtwirkungsgrad

Der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges}$  eines Solarturmkraftwerks gibt die Effizienz der Umsetzung von Sonnenstrahlung in elektrische Leistung  $P_{el}$  an. Der Einfluß einer eventuellen Zufeuerung mit fossiler Energieträgern soll hier nicht eingehen. Im folgenden wird  $\eta_{ges}$  auf die Strahlungsleistung bezogen, die auf die Spiegelfläche des Heliostatenfeldes  $A_{Hel}$  einfallen könnte:

$$\eta_{ges} = \frac{P_{el}}{E_{solar} \cdot A_{Hel}} \quad (2.1)$$

$E_{solar}$  ist hierbei die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung, also auf eine Fläche, die senkrecht zur Sonnenstrahlung steht. Die Heliostaten stellen den größten Kostenfaktor beim Bau eines Solarturmkraftwerks dar (Kribus 1998). Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, den Gesamtwirkungsgrad auf die Gesamtfläche der Heliostaten zu beziehen, weil eine Optimierung des Gesamtwirkungsgrades so die möglichst effiziente Nutzung der Heliostatenfläche mit einbezieht.

Den Gesamtwirkungsgrad kann man aufgrund des oben beschriebenen sequentiellen Leistungsflusses im Kraftwerk in vier Teilwirkungsgrade unterteilen. Der Wirkungsgrad des Heliostatenfeldes  $\eta_{Hel}$  beschreibt die Effizienz des Strahlungstransfers der Sonnenstrahlung auf die Eintrittsapertur des Sekundärreflektors:

$$\eta_{Hel} = \frac{P_{Sek}^{Ein}}{E_{solar} \cdot A_{Hel}} \quad (2.2)$$

$P_{Sek}^{Ein}$  ist hierbei die Strahlungsleistung auf der Eintrittsapertur des Sekundärreflektors. Einer genaueren Behandlung der Abbildungseigenschaften und Verluste des Heliostatenfeldes ist Abschnitt 2.2 gewidmet.

Der Wirkungsgrad des Sekundärreflektors ist seine Transmission  $\tau$  für die einfallende Strahlung, also das Verhältnis der Strahlungsleistungen auf der Aus- und Eintrittsapertur:

$$\tau = \frac{P_{Sek}^{Aus}}{P_{Sek}^{Ein}} \quad (2.3)$$

$P_{Sek}^{Aus}$  ist hierbei die Strahlungsleistung auf der Austrittsapertur des Sekundärreflektors. Die Verluste im Sekundärreflektor lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Das eine sind die Reflexionsverluste. Ein Teil der Strahlungsleistung wird von den Spiegeln absorbiert und geht somit für den Gesamtwirkungsgrad verloren. Außerdem erreicht ein Teil der Strahlung nicht die Austrittsapertur, weil er im Sekundärreflektor umgekehrt wird und ihn wieder durch die Eintrittsapertur verläßt. Dieser Effekt wird als Strahlumkehr bezeichnet (Rabl 1976; Welford 1989). Die Transmission  $\tau$  spielt eine zentrale Rolle bei der Charakterisierung des Sekundärreflektors und ist in den meisten Fällen die Zielgröße bei der Optimierung seiner Form.

Der Absorberwirkungsgrad  $\eta_{Abs}$

$$\eta_{Abs} = P_{Abs}^{Aus} / P_{Sek}^{Aus} \quad (2.4)$$

zeigt den Anteil der an das Arbeitsmedium übertragenen Leistung  $P_{Abs}^{Aus}$  an der vom Sekundärreflektor in den Absorber einfallenden Strahlungsleistung  $P_{Sek}^{Aus}$ . Zu den Verlusten tragen hierbei die Absorption und Reflektion von Strahlung am Eintrittsfenster, Wärmestrahlung vom heißen Absorber durch das Fenster und Wärmeleitungsverluste vom Absorber an die Umgebung bei.

Die Verlustleistung eines schwarzen Absorbers durch Wärmestrahlung  $P_{WS}$  hängt wesentlich mit der Konzentration durch den Sekundärreflektor zusammen (Pitman 1986):

$$P_{WS} = A_{Apertur} \cdot \sigma \cdot T_{Abs}^4. \quad (2.5)$$

Hierbei sind  $A_{Apertur}$  die Fläche der Eintrittsapertur des Absorbers,  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante und  $T_{abs}$  die Temperatur des Absorbers. Da die Fläche der Eintrittsapertur des Absorbers in aller Regel gleich der der Austrittsapertur des Sekundärreflektors ist, spielt hier die Konzentration der Strahlung durch das Heliostatenfeld und den Sekundärreflektor eine wesentliche Rolle, da eine hohe Konzentration ja die Bündelung der Strahlung auf eine kleine Apertur bedeutet. Eine höhere Konzentration bedeutet also eine kleinere Aperturfläche  $A_{Apertur}$  und damit geringere Verluste durch Wärmestrahlung.

Das letzte Glied in der Kette bildet der Wirkungsgrad des Wärme-Kraft-Prozesses zur Umwandlung der Wärmeleistung in elektrischen Strom  $\eta_{WK}$ . Er setzt sich aus den Wirkungsgraden der Turbinen und Generatoren zusammen und wird physikalisch durch den Wirkungsgrad eines Carnot-Prozesses begrenzt. Dementsprechend steigen auch die technisch realisierbaren Wirkungsgrade mit der Temperatur des Arbeitsmediums. Mit modernen kombinierten Gas- und

Dampfprozessen werden hier Werte von über 50% erreicht, die Eintrittstemperatur des Arbeitsmediums beträgt hierbei deutlich über 1000°C (Bohn 1995).

Der Gesamtumwandlungswirkungsgrad des Solarturmkraftwerks kann also wie folgt geschrieben werden:

$$\eta_{ges} = \eta_{Hel} \cdot \tau \cdot \eta_{Abs} \cdot \eta_{WK} \quad (2.6)$$

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit richtet sich auf die Optimierung des Sekundärreflektors, also von  $\tau$ . Der Sekundärreflektor kann aber nicht völlig isoliert betrachtet werden. So führt eine Optimierung des Heliostatenfeldes ohne Berücksichtigung der weiteren Stufen zu einer bestimmten Einstrahlung in den Sekundärreflektor. Für diese spezifische Strahlung muß der Sekundärreflektor optimiert werden, wobei die Zielgröße wiederum nicht eindeutig festgelegt werden kann, weil, wie in Abschnitt 1.1.2 dargelegt, immer ein Kompromiß zwischen hoher Konzentration, also Bestrahlungsstärke, und Transmission gefunden werden muß.

Es wird also für die gegebene Einstrahlung von einem Heliostatenfeld nicht nur ein Sekundärreflektor optimiert, sondern ein ganzer Satz von Sekundärreflektoren mit verschiedenen großen Austrittsaperturen. Die erreichbaren Transmissions- und Konzentrationswerte dieser verschiedenen Sekundärreflektoren ergeben wieder eine Kennlinie. Ein Sekundärreflektor mit großer Austrittsapertur erreicht hohe Transmissionswerte bei niedriger Konzentration. Mit einer kleinen Austrittsapertur erreicht man höhere Konzentration bei geringerer Transmission.

Die Größe der Austrittsapertur beeinflusst gleichzeitig linear die Verluste durch Wärmestrahlung aus dem Absorber. Die Wahl des optimalen Arbeitspunktes auf der Kennlinie bestimmt der gewählte Wärme-Kraft-Prozeß, insbesondere die Temperatur des Arbeitsmediums. Man wägt hierbei die Transmissionsverluste im Sekundärreflektor gegen die Wärmestrahlungsverluste des Absorbers ab.

## 2.2 Abbildungsfehler und Verluste beim Heliostatenfeld

Das Heliostatenfeld in seiner Gesamtheit ist ein abbildender Reflektor. Man kann es als ein in kleine unabhängige Facetten aufgeteiltes Fresnel-Paraboloid sehen, das die nahezu parallele Strahlung der Sonne in seinem Brennpunkt fokussiert. Diese Fresnel-Zerlegung erzeugt spezifische Abbildungsfehler und Einschränkungen des Strahlungstransfers, die in diesem Abschnitt erläutert werden sollen.

Im folgenden wird das Heliostatenfeld als eine von infinitesimal kleinen, ebenen Heliostaten so dicht wie möglich bedeckte Fläche angesehen (Spirkl 1997; Kribus 1998). In diesem Kontinuumsfeld sind die Heliostaten perfekt ausgerichtet und verursachen selber keinerlei Abbildungsfehler wie zum Beispiel Astigmatismus, der ja erst bei ausgedehnten und darum gekrümmten Spiegeln auftritt. Die Verluste und Abbildungsfehler beim Kontinuumsfeld resultieren allein aus dem Fresnel-Charakter des Heliostatenfeldes, also der Entkopplung der globalen Neigung des Feldes von der lokalen Neigung der Spiegel. Die physikalische Ausdehnung von realistischen Heliostaten und deren Anordnung untereinander (Lipps 1978; Leary 1979; Kistler 1986) spielen hier keine Rolle. Der Wirkungsgrad des Kontinuumsfeldes stellt somit eine physikalische Obergrenze für realisierbare Felder dar.

Nun wird ein infinitesimales Flächenelement  $dA$  auf dem Boden des Heliostatenfeldes betrachtet. Die einfallende Strahlung soll von einem Heliostaten reflektiert werden. Es können zwei unterschiedliche Situationen vorliegen.

Im ersten Fall steht die Sonne von  $dA$  aus gesehen höher als der Turm. Wie in Abbildung 2-2 dargestellt, ist also der Winkel zwischen der Sonnenstrahlung und der Senkrechten  $\phi_{\text{Sonne}}$  kleiner als der entsprechende Winkel  $\phi_{\text{Turm}}$  für die Ab-

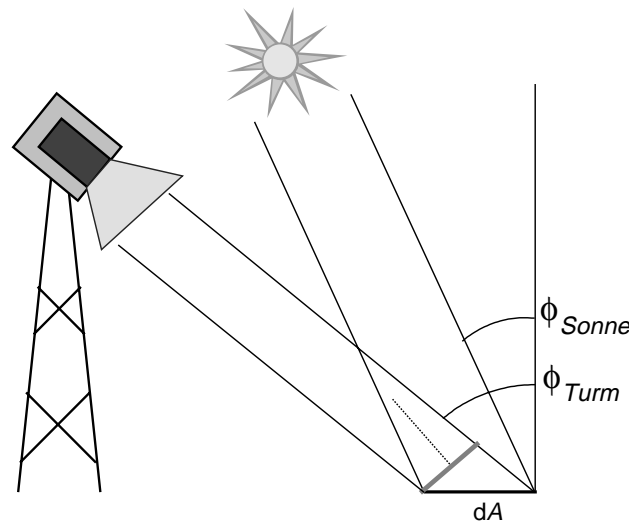


Abbildung 2-2: Steht die Sonne höher als der Turm, wird nicht alle auf den Boden einfallende Strahlung zum Turm reflektiert. Das ist der Fall bei hohem Sonnenstand oder bei weit vom Turm entfernten Heliostaten.

strahlung zum Turm. Auf das Bodenelement  $dA$  fällt mehr Strahlung von der Sonne ein, als von ihm abgestrahlt werden kann. Der Grund liegt darin, daß in das Phasenraumvolumen von Strahlung auf das Flächenelement der Cosinus des



Winkels der Strahlung zur Normalen auf die globale Ausrichtung des Feldes, also der Senkrechten, eingeht. Da in diesem Fall  $\phi_{\text{Sonne}} < \phi_{\text{Turm}}$ , ist das Phasenraumvolumen der Strahlung in Richtung Turm kleiner als das der Strahlung, die von der Sonne kommt. Der Heliostat (dicke graue Linie) wird so groß gewählt, daß er die maximal mögliche Strahlungsmenge in Richtung des Turmes reflektiert. Die auf den Boden fallende Strahlung geht nicht als Verlust in die Gesamteffizienz ein, wenn die Einstrahlung auf die Spiegelfläche bezogen wird.

In Abbildung 2-3 wird die andere Situation dargestellt. Der Turm steht von  $dA$  aus gesehen höher als die Sonne. In diesem Fall ist das Etendue der Strahlung, die zum Turm abgestrahlt werden kann, größer als das Etendue der Einstrahlung von der Sonne. Der Spiegel wird wiederum so angepaßt, daß alle einfallende Strahlung reflektiert wird. Vom Sekundärreflektor aus gesehen erscheinen Lücken zwischen den Heliostaten. Diese Löcher zwischen Gebieten der konzentrierten Sonnenstrahlung verdünnen die Strahlung von den betroffenen Teilen des Heliostatenfeldes und reduzieren somit die erreichbare Konzentration. Eine genaue Herleitung dieser Effekte ist in (Karni 1994) zu finden, einen geometrischen Zugang ohne Berücksichtigung des Etendue liefert (Riaz 1976).

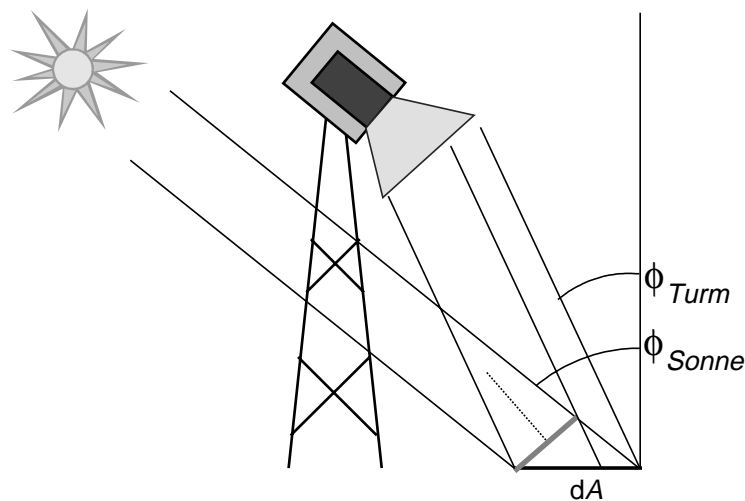


Abbildung 2-3: Steht die Sonne niedriger als der Turm, wird die gesamte auf den Boden einfallende Strahlung zum Turm reflektiert. Allerdings werden vom Turm aus Lücken zwischen den Heliostaten gesehen, die die einkommende Strahlung verdünnen. Das ist der Fall bei niedrigem Sonnenstand und bei nahe beim Turm stehenden Heliostaten.

Die Effizienz des Heliostatenfeldes wird auf dessen Spiegelfläche bezogen (s. Abschnitt 2.1.3). Der einzelne Heliostat wird von der Sonne aus unter einem bestimmten Winkel  $\alpha$  gesehen. Der Cosinus dieses Winkels zwischen der Sonnenstrahlung und der Normale des Heliostaten, also der lokalen Ausrichtung des Fresnel-Reflektors (s. Abbildung 1-1) geht als Faktor in die Effizienz des Helio-

staten ein. Dazu kommen noch die Absorptionsverluste bei der Reflexion der Sonnenstrahlung am Spiegel. Der Winkel  $\alpha$  halbiert immer den Winkel zwischen der einfallenden Sonnenstrahlung und der in Richtung des Turmes reflektierten Strahlung. Deswegen ist die Effizienz des einzelnen Heliostaten maximal, wenn der Winkelabstand zwischen Turm und Sonne klein wird.

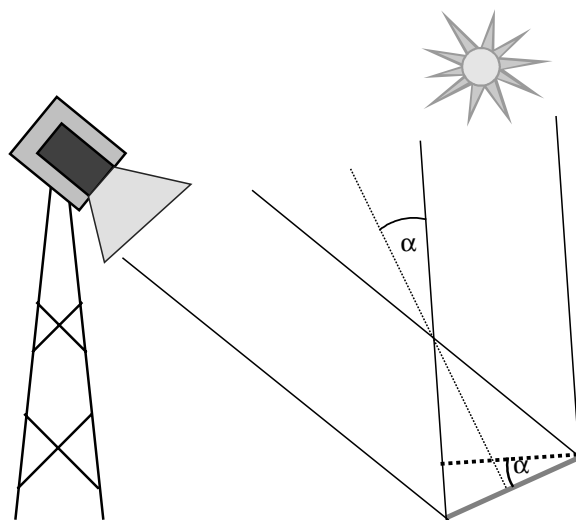


Abbildung 2-4: Die Effizienz eines einzelnen Heliostaten (graue Linie) richtet sich nach dem Winkel  $\alpha$  zwischen seiner Normalen und der Sonneneinstrahlung. Der Heliostat erscheint von der Sonne aus gesehen unter einer um den Faktor  $\cos \alpha$  kleineren Fläche (dicke, gepunktete Linie). Diese Fläche würde ausreichen um die Sonnenstrahlen zu reflektieren, der schräge Winkel verringert den Nutzungsgrad der Heliostatenfläche.

Jeder Heliostat bildet die Sonne auf die Eintrittsapertur des Sekundärreflektors ab. Die Größe dieses Bildes ist direkt proportional zur Entfernung des Heliostaten vom Sekundärreflektor, da die Strahlung im wesentlichen aus einem Kegel kommt. Unterschiedlich weit entfernte Heliostaten erzeugen also unterschiedlich große Bilder. Die Überlagerung dieser Bilder führt zu einer Verschmierung der Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Eintrittsapertur. Die Auswirkungen dieses Effektes werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

Zu bemerken bleibt, daß die beschriebenen Verlust- und Verdünnungsmechanismen vom Sonnenstand abhängen. Damit verändert sich die Effizienz eines einzelnen Heliostaten sowohl im Tages- als auch im Jahresverlauf. Die Größe eines Heliostaten im Kontinuumsfeld ist auch vom Sonnenstand abhängig. Es ist also kein statisches Feld, sondern stellt für einen gegebenen Sonnenstand das physikalische Optimum dar. Für die Auslegung von realen Heliostatenfeldern werden Simulationsprogramme verwendet, die die Effizienz jedes einzelnen Heliostaten im Jahreslauf unter Berücksichtigung seiner wirklichen Form und Abbildungseigenschaften berechnen (Lipps 1978; Leary 1979; Kistler 1986). Von

den möglichen Standorten im Heliostatenfeld werden dann diejenigen ausgewählt, die in der vorgesehenen Betriebszeit des Kraftwerkes die größte Effizienz erbringen.

## 2.3 Die Strahlung im Fokus eines Heliostatenfeldes

Die Strahlung in der Fokalebene des Heliostatenfeldes ist die Eingangsstrahlung für den Sekundärreflektor. Sie soll möglichst effizient konzentriert werden. In diesem Abschnitt werden die spezifischen Eigenschaften dieser Strahlung aufgezeigt, insbesondere ihre Verteilung im Orts- und Richtungsraum. Hierfür wird das Heliostatenfeld am WIS beschrieben, dessen Strahlung die Grundlage für die meisten der später vorgestellten optimierten Sekundärreflektoren bildet.

### 2.3.1 Das Heliostatenfeld am Weizmann Institute of Science

Das WIS verfügt über weitreichende Experimentiermöglichkeiten im Gebiet der konzentrierten Solarstrahlung. Das Kernstück bildet das experimentelle Heliostatenfeld mit dem dazugehörigen Laborturm. Abbildung 2-5 zeigt die Anlage. Das rechts zu erkennende Heliostatenfeld hat in etwa die Form eines Ringsegmentes. Im Turm sind auf mehreren Ebenen Labors untergebracht.



Abbildung 2-5: Das Heliostatenfeld am Weizmann Institute of Science mit dem Laborturm. Rechts sind die rechteckigen Heliostaten zu erkennen. Im Turm links sind auf fünf Ebenen Labors für Experimente mit hochkonzentrierter Sonnenstrahlung untergebracht.

Ziel dieser Arbeit ist es, sowohl die physikalischen als auch die unter den gegebenen Randbedingungen praktisch erreichbaren Grenzen der Konzentration von Strahlung eines Heliostatenfeldes mit realistischem Layout zu untersuchen. Es ist nicht das Ziel dieser Arbeit, das Heliostatenfeld mit seinen exakten Eigenschaften zu reproduzieren. Die im folgenden beschriebene Strahlung wurde für das Labor im neunten Stock simuliert, in dem auch die in Abschnitt 4 beschriebenen Versuche durchgeführt wurden. Für die Simulation wurde das Heliostatenfeld durch ein Kontinuumfeld mit elliptischer Grundfläche angenähert. Die geometrischen Verhältnisse sind in Abbildung 2-6 skizziert.

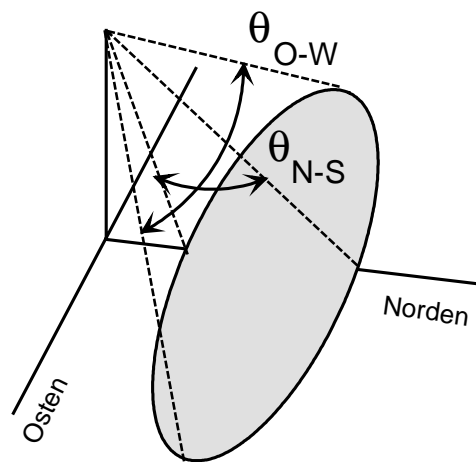


Abbildung 2-6: Skizze des Kontinuumfeldes, mit dem das Heliostatenfeld am WIS angenähert wird. Die Höhe des Fokus über dem Feld beträgt 38 m. Von dort, also vom Sekundärreflektor aus gesehen erscheint das Feld als Ellipse. Die von dort einfallende Strahlung kommt aus einem flachgedrückten Kegel mit den Öffnungswinkeln  $\theta_{N-S}=24^\circ$  in Nord-Süd-Richtung und  $\theta_{O-W}=80^\circ$  in Ost-West-Richtung

Man sieht, daß das gesamte Heliostatenfeld nördlich des Turmes angeordnet ist. Der Grund für diese sogenannte Nord-Feld Anordnung ist, daß die Sonne am Standort der Anlage immer am Südhimmel steht. Wenn die Sonne und der Turm vom Heliostaten aus gesehen einen kleinen Winkelabstand haben, ist die Effizienz der einzelnen Heliostaten am größten, wie im vorigen Abschnitt dargelegt wurde.

Die Ausdehnung des Heliostatenfeldes in Ost-West-Richtung ist wesentlich größer als in Nord-Süd-Richtung, sowohl im Ortsraum auf dem Feld, als auch im Richtungsraum von der Fokalebene aus gesehen. Der Grund hierfür ist, daß man versucht, die Bestrahlungsstärkeverteilung in der Fokalebene möglichst kompakt zu halten. Weit vom Turm entfernte Heliostaten werfen ein großes Bild der Sonne und schmieren die Verteilung somit aus (s. voriger Abschnitt).

### 2.3.2 Die Verteilung der Strahlung im Ortsraum

Die Bestrahlungsstärkeverteilung in der Fokalebene des Heliostatenfeldes ist in Abbildung 2-7 dargestellt. Die Verteilung ist nahezu rotationssymmetrisch, fällt aber von innen nach außen hin deutlich ab. Der Abfall entsteht durch die Überlagerung der verschiedenen Bilder der Sonne, die von den verschiedenen Orten im Heliostatenfeld erzeugt werden. Die Abstrahlung eines einzelnen Heliostaten erfolgt in einem Kegel mit Gauss'schen Richtungsprofil (s. Abschnitt 2.1.1). Die dargestellte Unterteilung in Eintrittsaperturen getrennter Sekundärreflektoren ermöglicht die getrennte Nutzung unterschiedlich dichter Strahlung, die im folgenden Abschnitt beschrieben wird. Ein Ring von fünfeckigen, peripheren Aperturen ist um die zehneckige, zentrale Apertur angeordnet.

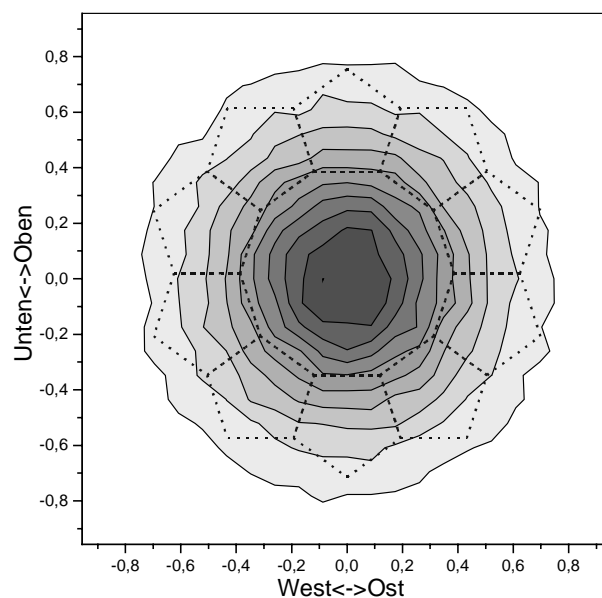


Abbildung 2-7: Verteilung der Bestrahlungsstärke in der Fokalebene des Heliostatenfeldes. Die Maßeinheit auf den Achsen ist 1 m. Die gestrichelten Linien stellen die Aufteilung der Aperturebene in einzelne Eintrittsaperturen für mehrere Sekundärreflektoren dar. Die einzelnen Stufen zeigen 10%-Schritte des Maximalwertes.

### 2.3.3 Die Verteilung im Richtungsraum

Abbildung 2-8 zeigt die Strahlstärkeverteilung, also die Verteilung der Strahlung im Richtungsraum in der Fokalebene des Heliostatenfeldes. Die Richtung, unter der Strahlung im Fokus des abbildenden Heliostatenfeldes eintrifft, repräsentiert im wesentlichen den Ort, von dem die Strahlung auf dem Feld ausgeht. Man erkennt, daß die Strahlung aus einem elliptischen Kegel einfällt, der die Projektion der elliptischen Form des Feldes repräsentiert. Strahlung vom nördlichen Rand des Feldes erscheint in der gewählten Darstellung oben, Strahlung

vom südlichen Rand des Feldes unten, bei negativen Werten von  $k_y$ . Die Strahlstärke nimmt zu kleineren Werten von  $k_y$  hin ab.

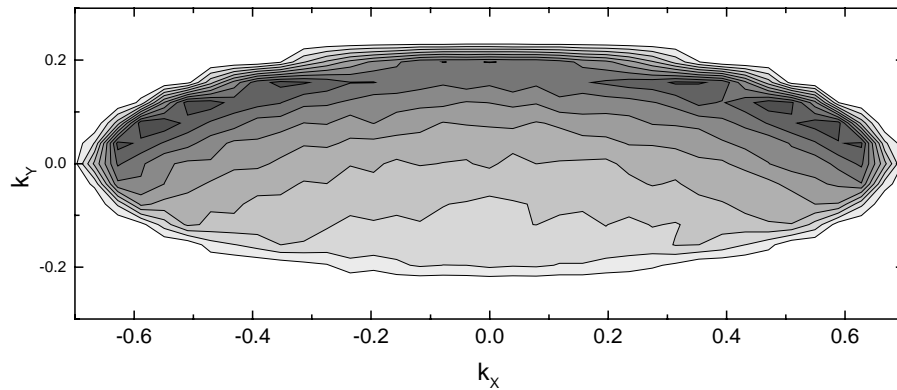


Abbildung 2-8: Strahlstärke: Verteilung der Strahlung auf der Fokalebene eines Heliostatenfeldes im Richtungsraum. Die Abstufungen sind 10% des Maximalwertes.

Jeder einzelne Heliostaten produziert ein Bild der Sonne in der Fokalebene des Feldes, das nicht scharf abgegrenzt ist, sondern dessen Bestrahlungsstärkeverteilung nach außen hin abfällt (s. Abschnitt 2.1.2). Die weiter entfernten Heliostaten am nördlichen Rand des Feldes werfen größere Bilder der Sonne auf die Fokalebene als die näher stehenden Heliostaten vom Südrand. Dies erzeugt eine Abhängigkeit der Strahlstärkeverteilung vom Ort in der Fokalebene. Im Zentrum der Fokalebene sieht man die Strahlung mit gleichmäßiger Strahlstärke aus dem gesamten vom Feld ausgefüllten Richtungsraum kommen. Je weiter man sich vom Zentrum der Fokalebene nach außen bewegt, desto weniger Strahlung kommt von den nahen Feldbereichen, die ja kleinere Sonnenbilder erzeugen. Da die Strahlung am Rand der Fokalebene vor allem auch aus den Randbereichen der einzelnen Sonnenbilder zusammengesetzt ist, wird die Strahlung hier auch im Richtungsraum insgesamt dünner. Abbildung 2-9 zeigt die Strahlstärkeverteilung auf der zehneckigen zentralen Apertur in Abbildung 2-7. Die Strahlung kommt vom gesamten Feld. Die Kontraste in der Strahlstärkeverteilung sind wesentlich weniger deutlich als in Abbildung 2-7, wo die gesamte Strahlung berücksichtigt wurde, also auch die am Rand der Apertur, die bevorzugt von den entfernten Teilen des Feldes kommt.

In Abbildung 2-10 ist die Strahlstärkeverteilung auf dem Ring von fünfeckigen Aperturen in Abbildung 2-7 aufgetragen. Die Strahlung hier ist deutlich dünner als auf der zentralen Apertur und kommt vornehmlich von den entfernten Teilen des Feldes. Der südliche Teil des Feldes liefert keinen nennenswerten Beitrag.

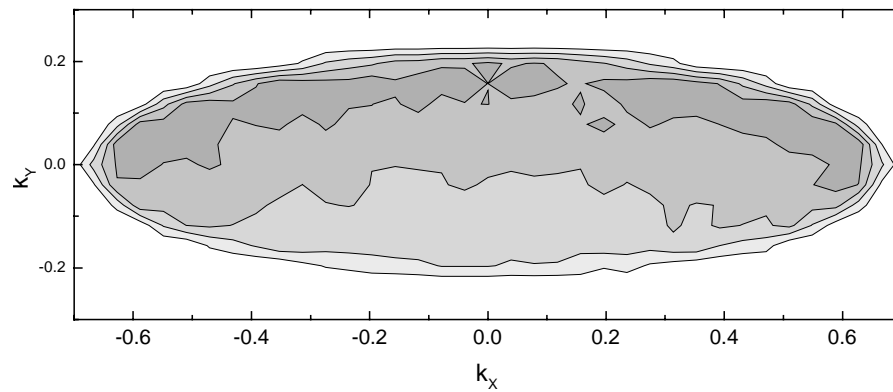


Abbildung 2-9: Strahlstärkeverteilung der Strahlung im Zentrum der Apertur.

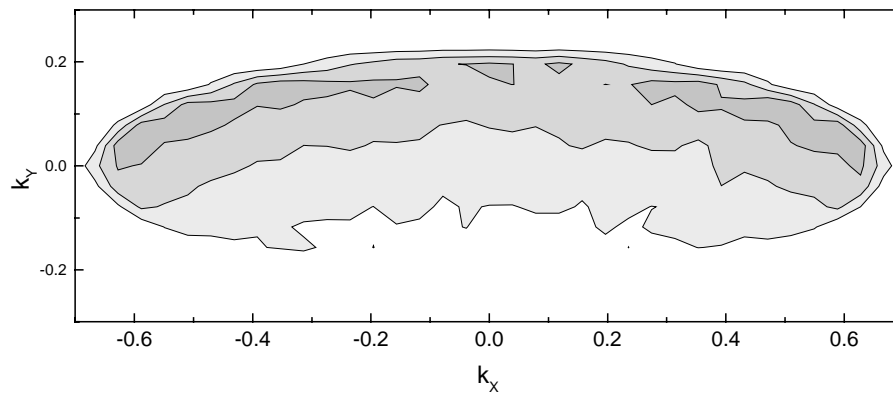


Abbildung 2-10: Strahlstärkeverteilung der Strahlung am auf den peripheren Aperturen.

Der Vergleich zwischen Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10 zeigt, daß im Zentrum der Fokalebene eine relativ homogene Strahlung aus dem gesamten vom Feld ausgefüllten Richtungsbereich vorherrscht. Diese Strahlung kann sehr gut mit Reflektoren konzentriert werden, die für Strahlung aus einem homogen ausgefüllten elliptischen Richtungsbereich entworfen sind. Solche Reflektoren wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und untersucht. Die Ergebnisse von optimierten Sekundärreflektoren für das Zentrum der Fokalebene werden in Abschnitt 3.4 gezeigt.

Reflektoren aus den Lehrbüchern der nichtabbildenden Optik sind in der Regel für Strahlung aus einem rotationssymmetrischen, homogen ausgefüllten Richtungsraum entworfen. Für die vorliegende Arbeit wurden diese auf Strahlung aus einem elliptischen Richtungsgebiet erweitert und unter gegebenen Randbedingungen optimiert. Zur Konzentration der Strahlung am Rand der Apertur besteht noch ein signifikantes Verbesserungspotential durch Einführung weiterer

asymmetrischer Freiheitsgrade in die Form der hier entwickelten Reflektoren (s. Abschnitt 5.1).

## 2.4 Thermisch mehrstufige Nutzung

Die Einstrahlung in der Fokalebene des Heliostatenfeldes ist, wie in Abbildung 2-7 gezeigt, im Ortsraum sehr ungleichmäßig verteilt. Die Bestrahlungsstärke fällt von sehr hohen Werten im Zentrum nach außen hin ab. Jedem einzelnen Wert der Bestrahlungsstärke kann eine Strahlungstemperatur zugeordnet werden. Dies ist die Temperatur desjenigen schwarzen Körpers, der mit der gleichen Bestrahlungsstärke strahlen würde (Bergmann 1971). Dies ist somit auch die Temperatur, die ein schwarzer Absorber im Gleichgewicht mit dieser Bestrahlungsstärke erreichen könnte, weil dann seine abgestrahlte Leistung die eingestrahlte kompensiert.

Wenn also die Gebiete mit unterschiedlicher Bestrahlungsstärke Gebieten mit unterschiedlicher Temperatur entsprechen, ist es naheliegend, diese unterschiedlichen Temperaturen bei der Umsetzung in mechanische Arbeit oder elektrischen Strom zu trennen, um nicht die mit hohen Temperaturen erreichbaren Wirkungsgrade mit den im Vergleich schlechteren zu mischen, die mit den niedrigeren Temperaturen zu erzielen sind.

Die Umsetzung dieses Prinzips auf Solarturmkraftwerke ist das Konzept der thermischen Mehrstufigkeit (Ries 1995; Kribus 1997). Es bedeutet, daß die Strahlung in der Fokalebene des Heliostatenfeldes nicht in einem einzigen Absorber umgesetzt wird, sondern in mehreren, die bei unterschiedlichen Temperaturen arbeiten. Eine Möglichkeit hierfür ist, jedem Absorber einen eigenen Sekundärreflektor zuzuordnen. Die Fokalebene des Feldes ist dann unterteilt durch die Eintrittsaperturen der einzelnen Sekundärreflektoren. Eine mögliche Strategie zur Unterteilung ist in Abbildung 2-7 dargestellt, wo die Strahlung im Zentrum der Fokalebene von einem Sekundärreflektor mit zehneckiger Eintrittsapertur konzentriert wird, der von einem Ring von weiteren Reflektoren mit fünfeckigen Eintrittsaperturen umgeben ist, die die weniger intensive Strahlung konzentrieren. Eine weitere mögliche Anordnung ist die Unterteilung der Fokalebene des Feldes in identische sechseckige oder rechteckige Eintrittsaperturen (Suresh 1990; Kribus 1998).

Abbildung 2-11 zeigt die maximal erreichbaren Kennlinien für Strahlung auf einen zentralen Sekundärreflektor und die peripheren Sekundärreflektoren (s. Abschnitt 1.1.2). Mit den peripheren Sekundärreflektoren erreicht man bei glei-



cher Transmission deutlich geringere Werte für die Konzentration. Dementsprechend kann man im zentralen Absorber deutlich höhere Temperaturen erreichen als in den peripheren Absorbern. Ursache für die geringere erreichbare Konzentration auf den äußeren Bereichen der Fokalebene ist die geringere Strahlstärke der hier einfallenden Strahlung.

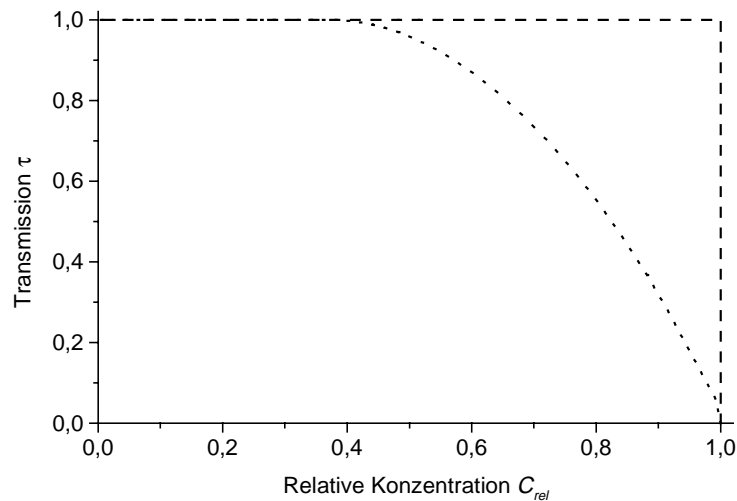


Abbildung 2-11: Optimale Kennlinien für Strahlung für zentrale (gestrichelt) und periphere (gepunktet) Sekundärreflektoren. Die Reflektoren am Rand der Apertur erreichen deutlich weniger Konzentration bei gleicher Transmission.

Abbildung 2-12 zeigt den Einfluß der Unterteilung in mehrere thermische Stufen für Umsetzung der Strahlung eines Heliostatenfeldes in Wärme. Es ist die erreichbare Leistungseffizienz in Abhängigkeit der Ausgangstemperatur des Arbeitsmediums aufgetragen. Die Ausgangstemperatur ist relativ zum erreichbaren Maximum angegeben. Man erkennt deutlich das Verbesserungspotential der Unterteilung in mehrere thermische Stufen. Der physikalische Grenzwert wird durch die Unterteilung in unendlich viele, infinitesimal kleine thermische Unterstufungen vorgegeben. Im Vergleich zu einer thermischen Stufe erreicht man durch die Einführung einer weiteren thermischen Stufe bereits etwa die Hälfte der möglichen Verbesserung.

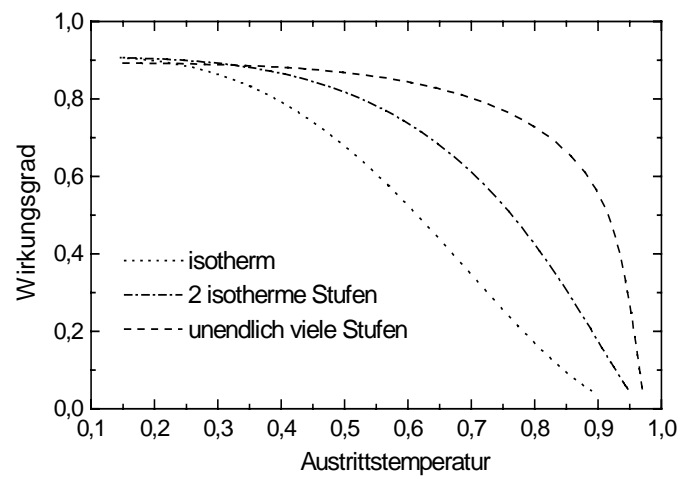


Abbildung 2-12: Thermischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Austrittstemperatur des Arbeitsmediums für eine, zwei und infinitesimal viele thermische Unterteilungen. Die Austrittstemperatur ist hier relativ zur maximal erreichbaren Temperatur angegeben.

---

### 3 Ergebnisse: Sekundärreflektoren für Solarturmkraftwerke

*In diesem Kapitel werden verschiedene neuartige Reflektoren zur Konzentration von Strahlung eines Heliostatenfeldes vorgestellt. Hierbei wird die Methode des Maßschneiderns nach Randstrahlen und die Optimierung mittels Strahlverfolgung angewandt.*

*In einem zweidimensionalen Querschnitt durch ein Nord-Feld in Nord-Süd-Richtung werden Reflektoren nach den Randstrahlen des Heliostatenfeldes maßgeschneidert. Die resultierenden Reflektorformen haben annähernd die Form von flachen Linienstücken. Die zwei Linienstücke, die den Sekundärreflektor bilden, sind nicht symmetrisch bezüglich einer beliebigen Achse. So haben sie zum Beispiel im allgemeinen unterschiedliche Längen und Neigungen.*

*Auf Basis der Ergebnisse des Maßschneiderns nach Randstrahlen wird ein asymmetrischer Konus-Reflektor als Sekundärreflektor für ein kreisförmiges Nord-Feld vorgestellt. Er verbindet eine elliptische Eintrittsapertur mit einer kreisförmigen Austrittsapertur. Der optimierte Konus-Reflektor ist deutlich besser zur Konzentration der Heliostatenstrahlung geeignet als ein CPC-Reflektor. Mit dem Konus erreicht man bei 80% Transmission eine um 22% höhere Konzentration der Strahlung. Dies zeigt, daß sich der optimierte Konus-Reflektor deutlich besser an die gegebene Strahlung anpassen kann als der bekannte CPC-Reflektor mit rotationssymmetrischer Richtungsakzeptanz.*

*In einem weiteren Abschnitt werden optimierte Reflektoren für Strahlung vorgestellt, die aus einem rotationssymmetrischen Richtungsbereich homogen auf die Eintrittsapertur einfällt. CPC-Reflektoren sind für diese Strahlung entworfen und auch gut zu ihrer Konzentration geeignet, weisen aber Transmissionsverluste auf. CPC-Reflektoren werden bisher am häufigsten als Sekundärreflektoren für Turmkraftwerke eingesetzt. Größere CPC-Reflektoren werden oft aus technischen Gründen aus ebenen oder eindimensional gekrümmten Facetten zusammengesetzt. Bei den vorgestellten Rechnungen wurde die Unterteilung des Reflektors in Facetten variiert und die endliche Reflektivität der verwendeten Spiegel einbezogen. Die optimierten Reflektoren weisen zum Teil erheblich bessere Transmissionwerte auf als nicht optimierte Formen, die den CPC-Reflektor approximieren. Die Form der optimierten Reflektoren weicht deutlich von der CPC-Form ab. Die gewählten Rahmenbedingungen wie Unterteilung des Reflektors in Facetten und Reflektivität der Spiegel beeinflussen die Form des optimierten Reflektors entscheidend. Dies unterstreicht die Bedeutung von*

*Optimierungsrechnungen bei der Entwicklung von Reflektoren zur Konzentration von Strahlung.*

*Im folgenden Abschnitt werden Reflektoren zur Konzentration von Strahlung im Zentrum der Fokalebene eines Heliostatenfeldes vorgestellt. Die hier verwendete Strahlung weist, ausgehend vom Heliostatenfeld am WIS, eine elliptische Verteilung im Richtungsraum auf. Es werden Reflektoren mit glatter Oberfläche und elliptischen Aperturen und solche aus ebenen oder eindimensional gekrümmten Facetten und mit sechseckigen oder viereckigen Aperturen vorgestellt. In allen Fällen erreichen asymmetrische Reflektoren mit unregelmäßigen Aperturen deutlich bessere Ergebnisse als symmetrische Reflektoren mit regelmäßigen Aperturen. Die besten Werte erreichen Reflektoren mit rechteckigen Aperturen, die aus vier eindimensional gekrümmten Blättern zusammengesetzt sind. Mit ihnen kann bei 90% Transmission die Konzentration der Strahlung im Vergleich zu symmetrischen Reflektoren mehr als verdoppelt werden.*

*Diese hervorragende Anpassung an die im Richtungsraum elliptisch verteilte Einstrahlung wurde auch für andere Fälle untersucht. Für Strahlung mit unterschiedlicher Ausdehnung und Exzentrizität im Richtungsraum wurden Reflektoren mit rechteckigen Aperturen optimiert. Die Kennlinien für gleichen mittleren Öffnungswinkel der Einstrahlung sind nur in sehr geringem Maße von der Richtungssexzentrizität abhängig und zeigen damit die sehr gute Anpassung der optimierten Reflektoren an die gegebene Einstrahlung.*

### **3.1 Maßschneidern nach Randstrahlen in zwei Dimensionen im Phasenraum**

Mit dem Maßschneidern nach Randstrahlen kann man in zwei Dimensionen einen Reflektor entwerfen, der eine gegebene Quellstrahlung vollständig auf ein Ziel überträgt (s. Abschnitt 1.2.1). Die in einem zweidimensionalen Querschnitt durch das Heliostatenfeld gefundenen Reflektorformen wurden als Ausgangspunkt für die optimierten, dreidimensionalen Sekundärreflektoren gewählt.

Der zweidimensionale Querschnitt, in dem das Maßschneidern angewandt wurde, ist in Abbildung 3-1 gezeigt. Der Nord-Süd Schnitt wurde gewählt, weil in diesem Schnitt die Asymmetrie des Nord-Feldes zum tragen kommt. In Ost-West-Richtung ist das Heliostatenfeld symmetrisch.

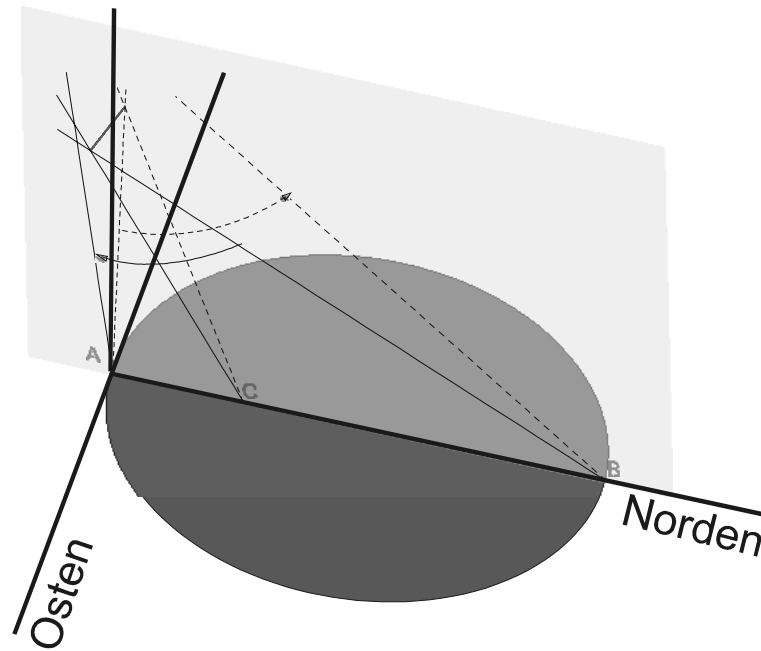


Abbildung 3-1: Das Maßschneidern nach Randstrahlen wird in einem zweidimensionalen Querschnitt angewandt, der die Senkrechte und die Nord-Süd Achse beinhaltet. Das Heliostatenfeld ist durch die dunkelgraue Ellipse gekennzeichnet.

Die Strahlungsverhältnisse in diesem Querschnitt sind in Abbildung 3-2 dargestellt. Die Heliostaten werfen Strahlung innerhalb eines Kegels in Richtung des Absorbers. Der Kegel jedes Heliostaten hat einen linken (unteren) und einen rechten (oberen) Randstrahl. Das Heliostatenfeld beginnt an der Position A direkt unterhalb des Absorbers und endet an der Position B, zwei Turmlängen von A entfernt. Die Randstrahlen des Heliostaten an Position C streifen den Absorber an dessen Rändern. Alle Heliostaten zwischen Position C und Position A sind so ausgerichtet, daß ihre rechten Randstrahlen den oberen rechten Rand des Absorbers streifen. Ihre linken Randstrahlen gehen unterhalb des Absorbers vorbei. Für diese Randstrahlen, angefangen beim Randstrahl des Heliostaten an Position C, wird ein Ast des Reflektors unterhalb des Absorbers maßgeschneidert. Ebenso gehen alle rechten Randstrahlen der Heliostaten zwischen Position C und Position B oberhalb des rechten oberen Randes des Absorbers vorbei. Für sie wird der obere Ast des Reflektors so maßgeschneidert, daß er die jeweiligen Randstrahlen der Heliostaten auf Randstrahlen des Absorbers reflektiert. Die beschriebene Ausrichtung der Heliostaten auf den unteren oder oberen Rand des Absorbers wird als *edge-ray-aiming* bezeichnet (Gordon 1993). Auf diesem Weg wird gewährleistet, daß an jedem Ort des Reflektors nur ein Randstrahl von der Quelle, dem Heliostatenfeld, vorliegt, der dann auf einen Randstrahl des Ziels, dem Absorber, reflektiert werden kann. Bei der sonst üblichen Ausrichtung aller Heliostaten auf einen gemeinsamen Zielpunkt, den die zentralen Strahlen aller

Heliostaten treffen, können Randstrahlen von zwei verschiedenen Heliostaten denselben Punkt des Reflektors treffen. Dort kann dann keine eindeutige Neigung des Reflektors mehr so festgelegt werden, daß das Randstrahlenprinzip befolgt wird, und das Maßschneidern scheitert (s. Abschnitt 1.2.2).

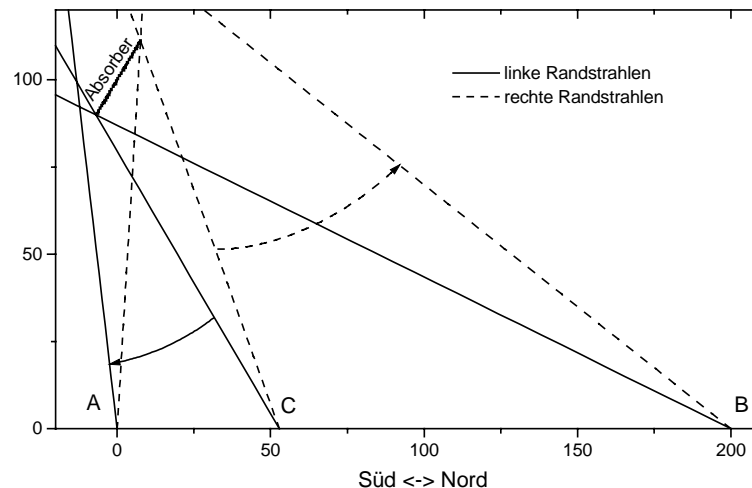


Abbildung 3-2: Die Strahlen des Heliostatenfeldes im Nord-Süd Schnitt. Die Strahlungskegel der Heliostaten sind zur Verbesserung der Anschauung deutlich vergrößert.

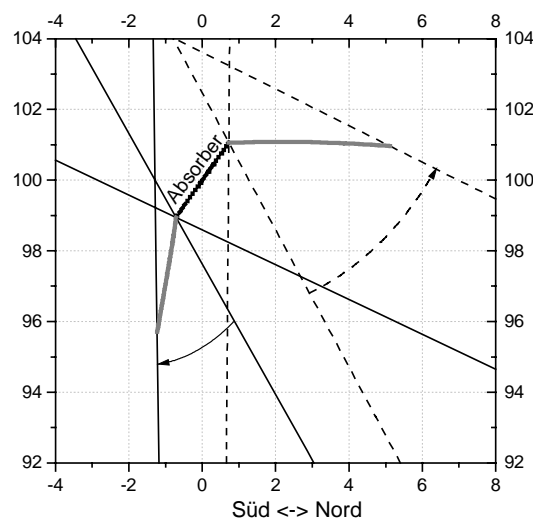


Abbildung 3-3: Maßgeschneiderter Sekundärreflektor (graue Linien) und Randstrahlen von den Heliostaten an den Positionen A, B und C entsprechend Abbildung 3-2. Der obere Ast des Reflektors reflektiert die rechten Randstrahlen der Heliostaten (gestrichelt) auf den linken Rand des Absorbers. Der untere Ast des Reflektors reflektiert die linken Randstrahlen der Heliostaten (durchgezogen) auf den rechten Rand des Absorbers. Die Maßeinheiten sind dieselben wie in Abbildung 3-2. Die Ausdehnung der Eintrittsapertur des Reflektors beträgt also unter 5 % der Ausdehnung des Heliostatenfeldes in Nord-Süd-Richtung.

Ein maßgeschneiderter Sekundärreflektor ist in Abbildung 3-3 gezeigt. Der Absorber ist im gezeigten Fall etwa 70 % größer als die Minimalfläche, auf die die Strahlung vom Heliostatenfeld konzentriert werden könnte (s. Abschnitt 1.1.2). Je kleiner der Absorber gewählt wird, desto größer wird der Reflektor. Wählt man als Ausdehnung des Absorbers gerade die Minimalfläche, dehnt sich der Reflektor vom Absorber bis zum Feld hin aus. Dies ist unpraktikabel, weil dann der Reflektor das gesamte Heliostatenfeld verschatten würde.

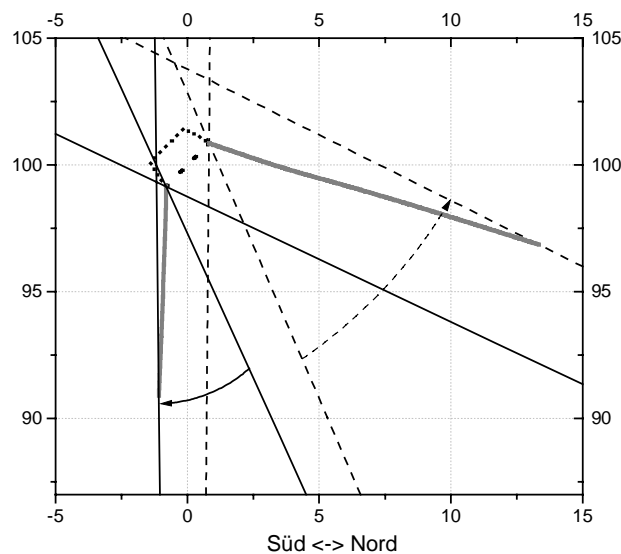


Abbildung 3-4: Maßgeschneiderter Sekundärreflektor wie in Abbildung 3-3, nur mit kleinerem Absorber. Zusätzlich zum maßgeschneiderten Reflektor ist hier ein weiterer CPC-Reflektor notwendig (gepunktet). Für die größere Konzentration ist eine deutlich größere Reflektorfläche notwendig.

Abbildung 3-4 zeigt einen weiteren maßgeschneiderten Reflektor für dieselbe Strahlung. Hier wurde der Absorber jedoch nur 25 % größer als die Minimalfläche gewählt. Er ist deswegen zu klein, um von den Randstrahlen eines Heliostaten an beiden Rändern gestreift zu werden, wie es für das Maßschneiden gefordert wird. Aus diesem Grund wird ein weiterer Reflektor eingeführt, dessen Eintrittsapertur die geforderte Bedingung erfüllt. Die Strahlung auf dieser Eintrittsapertur, die zum Absorber in der Austrittsapertur übertragen wird dient als Zielstrahlung beim Maßschneiden. Der hier eingesetzte Reflektor ist vom CPC-Typ. Der maßgeschneiderte Reflektor ist also so ausgelegt, daß er die Randstrahlen des Heliostatenfeldes auf die Randstrahlen der vom CPC-Reflektor akzeptierten Strahlen überträgt.

Bei beiden abgebildeten maßgeschneiderten Reflektoren fällt die nahezu gerade Form ins Auge. Besonders beim kleineren Reflektor in Abbildung 3-3 ist die

Krümmung des Reflektors kaum sichtbar. Die Ergebnisse des Maßschneiderns nach Randstrahlen im zweidimensionalen Querschnitt sollen als Grundlage für dreidimensionale Entwürfe für die optimierte Strahlverfolgung dienen, wie in Abschnitt 1.3 dargelegt wurde. Die nahezu gerade Form der hier vorgestellten Reflektoren im Nord-Süd Schnitt dient als Ausgangspunkt für die optimierten dreidimensionalen Reflektoren in Form eines asymmetrischen Konus, der im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

## 3.2 Konische Sekundärreflektoren

Die Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Maßschneiderns von Sekundärreflektoren im Nord-Süd-Querschnitt durch ein Heliostatenfeld aus dem vorherigen Kapitel werden hier in dreidimensionale Formen umgesetzt. Mit dem Maßschneidern nach Randstrahlen entworfene Reflektoren übertragen alle Strahlung von der Quelle ins Ziel. Dementsprechend sind die in diesem Abschnitt vorgestellten Formen dazu gedacht die gesamte Strahlung vom Heliostatenfeld auf einen Absorber zu konzentrieren. Sie sind also für die thermisch einstufige Umsetzung der Strahlung vorgesehen und nicht für die technisch aufwendigeren, thermisch mehrstufigen Lösungen gedacht, wie sie in Abschnitt 2.4 beschrieben wurden.

### 3.2.1 Das Heliostatenfeld

Jedes optische System zur Konzentration von Strahlung muß für eine bestimmte Quellstrahlung entworfen und optimiert werden. Sobald man diese Quellstrahlung verändert, verändert sich die Eignung des Systems zur Konzentration der Strahlung. Anders formuliert kann man sagen, daß ein optimales System für verschiedene Strahlung verschiedene Formen annehmen wird. Die Charakterisierung der Quellstrahlung ist deswegen ein wesentlicher Bestandteil der Beschreibung optimierter Reflektoren.

Das Heliostatenfeld ist in diesem Fall kreisrund. Der Radius entspricht der Höhe des Turmes, der am Südrand des Feldes steht. Im Nord-Süd-Querschnitt stellt sich das Feld also genauso dar wie das im vorherigen Abschnitt verwendete. Die Sonne steht im Süden mit einem Zenitwinkel von  $30^\circ$ .

Die kreisrunde Form des Feldes wurde willkürlich gewählt, um zu zeigen, wie sich die optimierte asymmetrische Reflektorform an die Form des Feldes anpassen läßt. Bisher vorgeschlagene oder verwendete Sekundärreflektoren sind immer rotationssymmetrisch. Sie sind für Strahlung entworfen, die im Richtungsraum



rotationssymmetrisch verteilt ist. Diese Strahlung fällt aus einem regelmäßigen Kegel auf die Eintrittsapertur des Sekundärreflektors ein. Die Strahlungsquelle, hier also das Heliostatenfeld, sollte innerhalb dieses Kegels liegen. Im Falle eines Nord-Feldes ist die Achse dieses Kegels nach Norden geneigt. Der Schnitt des Kegels mit der Bodenfläche bestimmt das Heliostatenfeld. Die Form des Heliostatenfeldes wird damit auf eine Ellipse beschränkt, deren große Halbachse in Nord-Süd-Richtung liegt. Heliostatenfelder, die nicht explizit für den Einsatz eines Sekundärreflektors ausgelegt sind, haben nicht diese Form (Winter 1991). Wie das in Abschnitt 2.3.1 beschriebene Feld am WIS sind sie üblicherweise in Ost-West-Richtung wesentlich weiter ausgedehnt als in Nord-Süd-Richtung. Mit dieser Feldform soll die Effizienz des Feldes maximiert werden (s. Abschnitt 2.2).

### 3.2.2 Die Form der konischen Sekundärreflektoren

Konische Reflektoren wurden bereits früher als Sekundärreflektoren für Solarturmkraftwerke vorgeschlagen (Athavaley 1979; Galal 1988; Friedman 1995; Schöffel 1995). Behandelt wurden jeweils rotationssymmetrische Kegelstümpfe, die entweder mit ihrer Achse senkrecht nach unten ausgerichtet waren, weshalb das Heliostatenfeld rotationssymmetrisch um den Turm verteilt sein mußte oder der Konus nach schräg unten in Richtung eines Nord-Feldes ausgerichtet war.

Die im vorherigen Abschnitt gefundenen Formen im Nord-Süd-Schnitt zeigen zwar nahezu flache Profile, aber keine Achsensymmetrie. Deshalb sind die hier vorgestellten konischen Reflektoren nicht rotationssymmetrisch.

Die Reflektoren verbinden eine elliptische Eintrittsapertur mit einer kreisrunden Austrittsapertur. Die kreisrunde Austrittsapertur schließt gut an die kreisförmigen Eintrittsfenster bestehender Hochtemperaturabsorber an (s. a. Abschnitt 3.4). Beide Aperturen stehen nicht notwendigerweise senkrecht auf der Achse des Reflektors, der Verbindungslinie der Mittelpunkte der Aperturen. Die Reflektorfläche weist nur eindimensionale Krümmung auf, kann also auf eine ebene Fläche abgerollt werden. Die Lage und Form der Eintrittsapertur und die Neigungen der Ein- und Austrittsapertur sind nicht fest vorgegeben. Sie werden durch die Optimierung bestimmt. Die resultierende Form wird im weiteren als asymmetrischer Konus bezeichnet. Dieser schiefe Konus ist im allgemeinen kein schief abgeschnittener rotationssymmetrischer Konus. Abbildung 3-5 zeigt einen solchen Reflektor. Die angegebenen Dimensionen stimmen mit den Angaben in den Abbildungen des vorherigen Abschnitte überein, der Turm ist 100 Einheiten hoch.

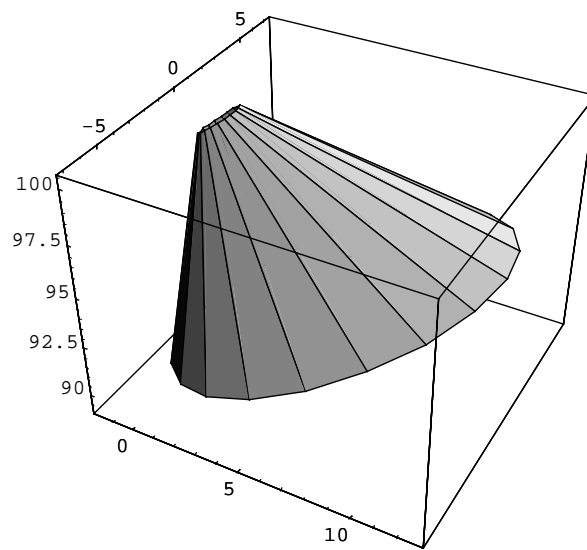


Abbildung 3-5: Asymmetrischer Konus-Reflektor. Die nach rechts gerichtete Achse zeigt nach Norden. Man erkennt die große, elliptische Eintrittsapertur und den Rand der kleineren, runden Austrittsapertur. Die Facetten dienen hier nur der Darstellung. Der schiefe Konus hat in der Strahlverfolgungsrechnung eine glatte, eindimensional gekrümmte Oberfläche.

Im letzten Abschnitt wurden maßgeschneiderte Reflektoren gezeigt, die bei kleineren Austrittsaperturen einen weiteren CPC-Reflektor zwischen ihrer Austrittsapertur und dem Absorber haben. Um dies auch bei den optimierten drei-

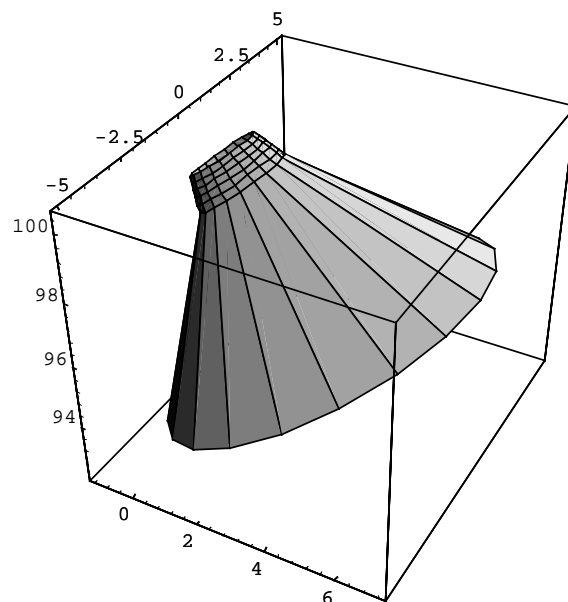


Abbildung 3-6: Asymmetrischer Konus-Reflektor mit nachgeschaltetem CPC-Reflektor. Die Facetten dienen hier nur der Darstellung. Der schiefe Konus hat in der Strahlverfolgungsrechnung eine glatte, eindimensional gekrümmte Oberfläche, der CPC-Reflektor hat eine zweidimensional gekrümmte Oberfläche.

dimensionalen Reflektoren zu ermöglichen, wurden auch asymmetrische Konus-Reflektoren untersucht, die ihrerseits hinter der Austrittsapertur einen dreidimensionalen CPC-Reflektor haben, an dessen Austrittsapertur der Absorber ansetzt.

### 3.2.3 Die Optimierung

Im Optimierungsprozeß wird die Form des Sekundärreflektors so oft variiert, bis eine davon abhängige Zielgröße einen optimalen Wert angenommen hat und sich nicht mehr signifikant verändert. Die Zielgröße ist bei allen hier vorgestellten Optimierungsrechnungen die Transmission  $\tau$  der Strahlung durch den Sekundärreflektor.

Im zentralen Rechenschritt wird der Weg eines Ensembles von Strahlen, die die Strahlung vom Heliostatenfeld repräsentieren, durch den Sekundärreflektor berechnet. Bei jeder Reflexion verliert ein Strahl entsprechend der Reflektivität des Sekundärreflektors einen Teil der ihm zugeordneten Leistung. Bei diesen Rechnungen wurde eine Reflektivität von 95 % angenommen. Aus den Statistiken der einfallenden und der zur Austrittsapertur übertragenen Strahlung wird dann die Transmission, also der Anteil der übertragenen Strahlungsleistung, berechnet. Des weiteren können auch noch andere Größen, wie zum Beispiel die Konzentration der Strahlung auf der Austrittsapertur oder die mittlere Anzahl der Reflexionen, denen ein Strahl unterliegt, berechnet werden.

Die Formparameter, die zur Optimierung variiert werden, sind beim Konus-Reflektor die Neigungen der Ein- und Austrittsaperturen, die Lage der Eintrittsapertur und die Längen der Halbachsen der elliptischen Eintrittsapertur. Wird der Konus-Reflektor noch mit einem CPC-Reflektor kombiniert, kommen zu diesen sechs Formparametern drei weitere hinzu. Der Durchmesser der kreisförmigen Austrittsapertur ist ein Parameter, der während der Optimierung festgehalten wird. Um die Kennlinie zu erhalten, wird aber eine ganze Reihe von Sekundärreflektoren mit unterschiedlich großen Austrittsaperturen unabhängig voneinander optimiert.

Die Parameter können im Optimierungsprozeß nicht völlig frei variiert werden. Zum einen beschränkt sich der Wertebereich beispielsweise bei den Längen der Halbachsen der Eintrittsapertur auf positive Werte. Andererseits können aber auch technisch bedingte Rahmenbedingungen einbezogen werden. So wurde hier die Gesamtgröße der Konus-Reflektoren beschränkt, um technisch realisierbare Formen zu gewährleisten und die Verschattung des Heliostatenfeldes durch den Sekundärreflektor zu begrenzen.

### 3.2.4 Die Ergebnisse

Für die Situation des kreisrunden Nordfeldes mit einem einzigen Sekundärreflektor wurden folgende Konzepte untersucht:

- kein Sekundärreflektor,
- ein CPC-Reflektor als Sekundärreflektor ,
- ein Konus-Reflektor,
- eine Kombination aus Konus- und CPC-Reflektor.

Für jedes einzelne dieser Konzepte wurden 14 Reflektoren optimiert, die sich in der Größe ihrer Austrittsaperturen unterscheiden. Für den Fall, daß kein Sekundärreflektor eingesetzt wird, entspricht die Austrittsapertur natürlich der Eintrittsapertur, deren Größe zur Berechnung der ganzen Kennlinie variiert, und deren Lage und Neigung optimiert wurde.

Abbildung 3-7 zeigt die Kennlinien für die untersuchten Konzepte. Die ‚Rangfolge‘ der Konzepte ist klar zu sehen. Liegt eine Kennlinie oberhalb einer anderen, werden bei gleicher Konzentration höhere Transmissionswerte erreicht, beziehungsweise bei gleicher Transmission höhere Konzentration. Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den Kennlinien in Abbildung 3-7 gewinnen:

- Ab einer relativen Konzentration von 0.18 ermöglicht der Einsatz eines Sekundärreflektors deutlich höhere Transmissionswerte. Eine relative Konzentration von mehr als 0.32 erfordert einen Sekundärreflektor, sie ist ohne ihn nicht zu erreichen.
- Die Konus-Reflektoren erreichen über einen weiten Bereich der Kennlinie bei gleicher Transmission deutlich höhere Konzentrationswerte als die CPC-Reflektoren.
- Die Kombination von Konus- und CPC-Reflektor erreicht noch eine geringfügige Verbesserung gegenüber dem Konus-Reflektor.
- Der Bereich von 70 % - 90 % Transmission ist interessant für praktische Anwendungen. Bei 80 % Transmission erreicht man gegenüber dem CPC-Reflektor mit dem Konus-Reflektor eine um 22 % höhere Konzentration, beim kombinierten Reflektor beträgt die Verbesserung 26 %.

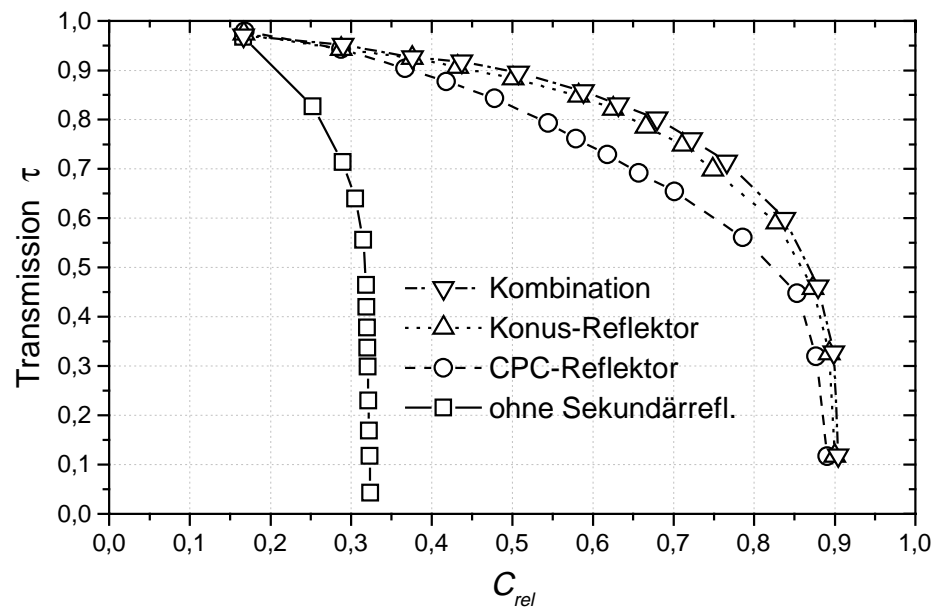


Abbildung 3-7: Kennlinien für die vier untersuchten Konzepte. Ab einer relativen Konzentration von etwa 1,8 ist der Einsatz eines Sekundärreflektors sinnvoll. Die Konus-Reflektoren erreichen bei gleicher Transmission deutlich höhere Werte in der Konzentration als die CPC-Reflektoren.

Es konnte also gezeigt werden, daß der Konus-Reflektor als Sekundärreflektor im Falle einer thermisch einstufigen Umsetzung der Strahlung deutlich besser an die Strahlung eines vorgegebenen Heliostatenfeldes angepaßt werden kann als der CPC-Reflektor.

### 3.3 Reflektoren für homogene, rotationssymmetrische Strahlung

CPC-Reflektoren sind als Konzentratoren für Strahlung konzipiert, die homogen verteilt aus einem Richtungskegel auf die Eintrittsapertur einfällt (s. Abschnitt 1.2.2). Sie werden auch als Sekundärreflektoren für die Strahlung von einem Heliostatenfeld vorgeschlagen und verwendet (Rabl 1976; Suresh 1990; Winter 1991; Schöffel 1995; Abele 1996; Segal 1996; Miron 1998). Der dreidimensionale CPC ist jedoch kein idealer Konzentrador. Auch bei idealem Reflektionsgrad wird ein Teil der Strahlung, für die er entworfen wurde, nicht auf die Austrittsapertur übertragen. Durch leichte Variation in der Form des CPC kann man seine Transmission noch verbessern (Shatz 1995). Andererseits kann ein unendlich lang ausgedehnter Konus mit 100 % Reflektivität eine Transmission von 100 % erreichen (Schöffel 1995).

Zum Entwurf von technisch realisierten Sekundärreflektoren wurden bisher in aller Regel CPC-Reflektoren gemäß den technischen Randbedingungen approximiert und die entstehenden Verluste durch Absorption und Strahlumkehr hingenommen. Zur Verbesserung der Transmission wurde lediglich der Reflektor an der Eintrittsapertur gekürzt, um die mittlere Anzahl der Reflektionen und damit die Reflexionsverluste zu reduzieren (Rabl 1976; Carvalho 1985; Welford 1989). Im folgenden wird gezeigt, daß unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen optimierte Reflektoren zum Teil deutlich von der Form des CPC-Reflektors abweichen und die Transmission im Vergleich zu den nicht optimierten CPC-Approximationen signifikant erhöht werden kann.

### 3.3.1 Technische Rahmenbedingungen

Es gibt CPC-Reflektoren bis zu einer Größe von etwa 30 cm, die aus einem Stück gefertigt sind. Solche Formen können aus einem massiven Stück gefräst oder aus Blech gezogen werden (Suresh 1990; O'Gallagher 1995). Die reflektierende Schicht muß dann durch Beschichten mit Metall oder Dielektrika aufgebracht werden, da man die glatte, zweidimensional gekrümmte Fläche nicht mit Glasspiegeln bekleben kann. Größere Reflektoren werden in aller Regel nicht mehr in einem Stück gefertigt, sondern aus ebenen oder eindimensional gekrümmten Facetten zusammengesetzt (Abele 1998; Levy 1998; Miron 1998). Die Aufteilung in Facetten kann man durch zwei Parameter beschreiben:

- Die Anzahl der Unterteilungen (Segmente) in axialer Richtung. Die Länge der Segmente muß nicht konstant sein.
- Die Anzahl der Unterteilungen im Schnitt senkrecht zur optischen Achse. Wegen der Rotationssymmetrie der einfallenden Strahlung werden diese Querschnitte üblicherweise ein regelmäßiges Polygon darstellen.

Im Grenzfall unendlich vieler axialer Segmente werden die entstehenden eindimensional gekrümmten Facetten auch als Blätter bezeichnet. Im Grenzfall der glatten Unterteilung im achsensenkrechten Querschnitt ist der Reflektor aus Kegelstümpfen zusammengesetzt (s. Abbildung 3-8).

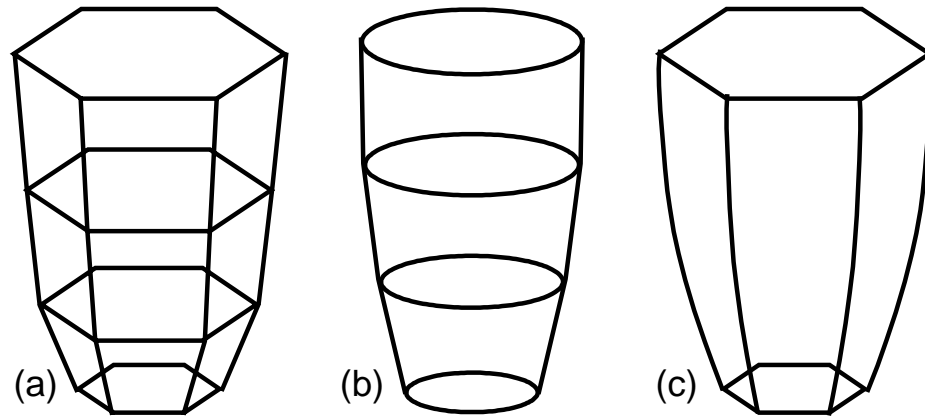


Abbildung 3-8: Verschiedene Strategien der Facettierung eines Reflektors.: Der Reflektor in (a) ist aus ebenen Facetten aufgebaut. Er hat 3 axiale Segmente und einen sechseckigen Querschnitt senkrecht zur optischen Achse. Der Reflektor in (b) hat ebenfalls drei axiale Segmente. Der Querschnitt senkrecht zur optischen Achse ist als Grenzwert unendlich vieler Unterteilungen kreisförmig. Der Reflektor ist also aus Kegelstümpfen zusammengesetzt. In (c) hat der Reflektor einen sechseckigen Querschnitt senkrecht zur optischen Achse. Das Profil längs der Achse ist als Grenzwert unendlich vieler Unterteilungen glatt. Die eindimensional gekrümmten Facetten werden auch als Blätter bezeichnet.

Außer fertigungstechnischen Gründen haben Reflektoren mit polygonalem Querschnitt auch den Vorteil, daß man sie im Falle von Drei-, Vier- oder Sechsecken dicht aneinander packen kann, um eine ungleichmäßige Strahlungsverteilung thermodynamisch sinnvoll zu nutzen, ohne Strahlung in Lücken zu verlieren (s. Abschnitt 2.4).

Die Reflektivität der verwendeten Materialien wie Aluminium oder silberbeschichtetem Glas liegen zwischen 90 % und 97 %, wobei Langzeitmessungen auf eine maximale dauerhafte Reflektivität von 95 % hindeuten (DLR 1998).

### 3.3.2 Parameterisierung der Formen

Es wurden Reflektoren mit verschiedener Unterteilung in axialer und achsen-senkrechter Richtung untersucht. Als Grenzfall der Unterteilung in axialer Richtung wurden auch Reflektoren aus eindimensional gekrümmten Blättern betrachtet. Die Flächen von Ein- und Austrittsapertur sind vorgegeben. Die Fläche der Austrittsapertur entspricht der Minimalfläche für die Strahlung auf der Eintrittsapertur. Bei perfekter Transmission würde auf dieser Austrittsapertur also die maximal erreichbare Konzentration erzielt. Für die betrachteten Fälle beträgt das Flächenverhältnis zwischen Ein- und Austrittsapertur 4.0 ( $30^\circ$  halber Öffnungswinkel) beziehungsweise 33.2 ( $10^\circ$  halber Öffnungswinkel).

Um die Form der Reflektoren entlang eines Schnittes zu beschreiben, der die optische Achse enthält, wurden abhängig von der Anzahl der axialen Segmente

vier verschiedene Strategien gewählt. Dieses axiale Profil beschreibt zusammen mit der Ordnung des Polygons im achsensenkrechten Schnitt die Form des Reflektors vollständig.

- Im Falle von zwei Segmenten ist die Lage des einen Eckpunktes im Profil völlig frei.
- Bei drei und vier Segmenten liegen die Eckpunkte des Profils auf einem Bezier-Spline. Die axiale Lage der Punkte ist Gegenstand der Optimierung.
- Bei fünf und mehr Segmenten liegen die Eckpunkte wiederum auf einem Bezier-Spline. Der axiale Abstand zwischen den Punkten ist jedoch konstant.
- Im Falle der eindimensional gekrümmten Blätter wurde ein parabolisches Profil optimiert.
- Die Länge des Reflektors, also seine axiale Ausdehnung zwischen Ein- und Austrittsapertur, sind in jedem Falle Gegenstand der Optimierung.

Die Festlegung der radialen Positionen der Ecken auf Bezier-Splines im Falle von mehr als drei Segmenten dient zur Reduzierung der Anzahl der Parameter der Optimierung. Das gleiche gilt für die festen axialen Längen im Falle von fünf und mehr Segmenten.

### 3.3.3 Die verwendete Strahlung

Die Strahlung, für die ein CPC-Reflektor konzipiert ist, ist im Ortsraum auf der Eintrittsapertur homogen verteilt. Sie kommt aus einem Richtungskegel mit halbem Öffnungswinkel  $\theta$ , dessen Achse senkrecht auf der Eintrittsapertur steht. Die Transmission der Strahlung auf die Austrittsapertur wird in diesem Fall relativ zur Strahlung auf der – polygonalen – Eintrittsapertur angegeben.

Der dreidimensionale CPC-Reflektor mit perfekt reflektierender Oberfläche transmittiert nicht alle Strahlung, für die er konzipiert ist. Ein Teil der Strahlung erreicht nicht die Austrittsapertur. Diese nicht akzeptierte Strahlung fällt aus Winkeln nahe dem nominellen Akzeptanzwinkel  $\theta$  zur Normale auf die Eintrittsapertur ein. In Abhängigkeit von diesem Winkel findet der Übergang von 90% zu 10% Transmission innerhalb eines Bereiches von  $3^\circ$  statt (Welford 1989). Die Strahlung in diesem extremen Winkelbereich, der einen Ring im Richtungsraum füllt, ist also ein besonders guter Indikator für die Transmission eines CPC-Reflektors. Nahezu alle Strahlung innerhalb des Ringes wird akzeptiert, die Verluste treten im Ring selber auf (s. Abbildung 3-9). Aus diesem Grund konnte die Optimierung in diesem Fall deutlich durch die im folgenden dargestellte Vorgehensweise beschleunigt werden.



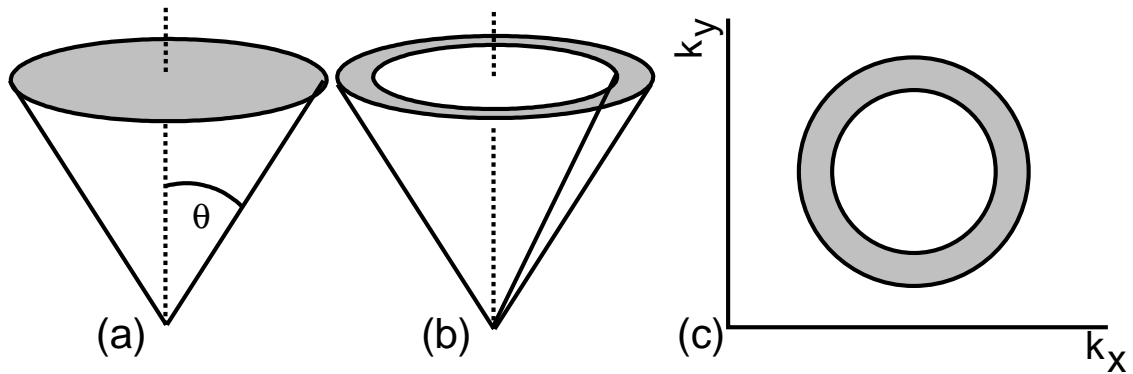


Abbildung 3-9: (a) Die Strahlung kommt aus einem Kegel mit dem halben Öffnungswinkel  $\theta$ . (b) Verluste durch Strahlunkehr treten nur für Strahlung auf, die unter einem Winkel nahe  $\theta$  zur Senkrechten auf die Eintrittsapertur einfallen. (c) Im Richtungsraum füllen diese Strahlen einen Ring, dessen äußerer Radius  $\sin\theta$  beträgt. Alle Strahlung innerhalb des Ringes wird auf die Austrittsapertur übertragen, allerdings erleidet sie Verluste durch nicht perfekte Reflektivität der Oberflächen.

Im ersten Optimierungsschritt wurden die Reflektoren nur unter Einsatz von Strahlung auf diesem Ring im Richtungsraum optimiert. Die Rechenzeit ist dadurch erheblich verkürzt, weil nur ca. 25% der eigentlichen Strahlung betrachtet wurden. Durch die hohe Sensitivität der Akzeptanz auf diese Strahlung sind die relativen Unterschiede in der Transmission zwischen 'guten' und 'sehr guten' Reflektoren deutlich höher. Aufgrund der verkürzten zentralen Rechenzeit und der besseren Unterschiede konnte ein gründlicher Algorithmus verwendet werden, der verhältnismäßig viele Rechenschritte zum Erreichen eines Maximums braucht, aber den zur Verfügung stehenden Parameterraum weit ausschöpft.

In der zweiten Stufe wurde mit den gefundenen Optima als Startwerten unter Verwendung der gesamten Strahlung die Optimierung für alle betrachteten Formen mit einem Algorithmus durchgeführt, der zuverlässig die Optima in der näheren Umgebung des Startwertes im Parameterraum findet (s. Abschnitt 1.3).

### 3.3.4 Transmission der optimierten Formen

Es wurden Reflektoren mit acht verschiedenen polygonalen Querschnitten und acht verschiedenen axialen Unterteilungen optimiert. Die Reflektivität der Spiegel wurde als 90% beziehungsweise 95% angenommen.

Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 zeigen die Transmission der optimierten Reflektoren in Abhängigkeit von der axialen Unterteilung und der Ecken im Querschnitt. Außerdem ist die Transmission für nicht optimierte CPC-Approximationen mit sechseckigem Querschnitt (graue Linien) eingetragen. Der Über-

sicht halber sind nicht die Ergebnisse für alle optimierten und berechneten Formen dargestellt. Man kann folgende Ergebnisse gewinnen:

- Die optimierten Formen mit sechseckigem Querschnitt erreichen deutlich höhere Transmissionswerte als die CPC-Approximationen. Dies gilt im besonderen für Strahlung mit kleinerem Öffnungswinkel. Die Transmission der optimierten Reflektoren liegt bis zu 18 % über der der nicht optimierten.
- Jede Erhöhung der Anzahl der Unterteilungen führt zu einer besseren erreichbaren Transmission. Je glatter also der Reflektor, desto höher ist seine Transmission. Das gilt für die Unterteilung in axiale Segmente genauso wie für die Unterteilung des Querschnittes in Polygone.
- Bei einer höheren Anzahl von axialen Segmenten wurde die Form der axialen Profile auf Bezier-Splines und feste axiale Unterteilung eingeschränkt. Diese zunehmende Einschränkung der Formen bei höherer Anzahl der axialen Segmente wirkt sich nicht erkennbar negativ auf die erreichbare Transmission aus. Wäre dies der Fall müßten Unstetigkeiten oder Knicke bei den Transmissionskurven an den Übergangsstellen zwischen den beschriebenen Konzepten sichtbar sein. Die Kurven sind jedoch generell glatt.
- Unabhängig von der Reflektivität weisen die Reflektoren für kleinere Öffnungswinkel ein wesentlich höheres Potential zur Verbesserung durch mehr axiale Segmente und mehr Unterteilungen im Querschnitt auf.
- Bei der Unterteilung des Querschnittes senkrecht zur optischen Achse in Polygone fällt auf, daß unabhängig von der Anzahl der axialen Segmente der Schritt vom 3-seitigen zum 4-seitigen Polygon bereits 40 % - 50 % der gesamten Transmissionszunahme vom 3-seitigen bis zum 48-seitigen Polygon ausmacht.
- Ebenso gilt für die Unterteilung in axiale Segmente, daß der Schritt von einem zu sechs Segmenten unabhängig vom polygonalem Querschnitt etwa 70 % ( $\theta = 10^\circ$ ) bzw. 85 % ( $\theta = 30^\circ$ ) der erreichbaren Verbesserung bis hin zu parabolischen Blättern ausmacht.
- Auch in absoluten Werten gilt, daß bei  $10^\circ$  halben Öffnungswinkeln die Unterteilung in mehr axiale Segmente als zum Beispiel sechs noch deutlichere Gewinne bringt als bei  $30^\circ$ .
- Die Reflektoren für Strahlung mit  $30^\circ$  halben Öffnungswinkel erreichen durchweg deutlich höhere Transmission als die vergleichbaren Reflektoren für Strahlung mit  $10^\circ$  halben Öffnungswinkel. Das entspricht den Erwartun-

gen, weil bei kleinerem Öffnungswinkel die mittlere Anzahl der Reflexionen pro Strahl steigt und damit Reflexionsverluste zunehmen (Rabl 1976).

- Wie zu erwarten, erreichen die Reflektoren bei 95% Reflektivität der Spiegel zwischen 5 % und 12 % höhere Transmission als bei 90 % Reflektivität.

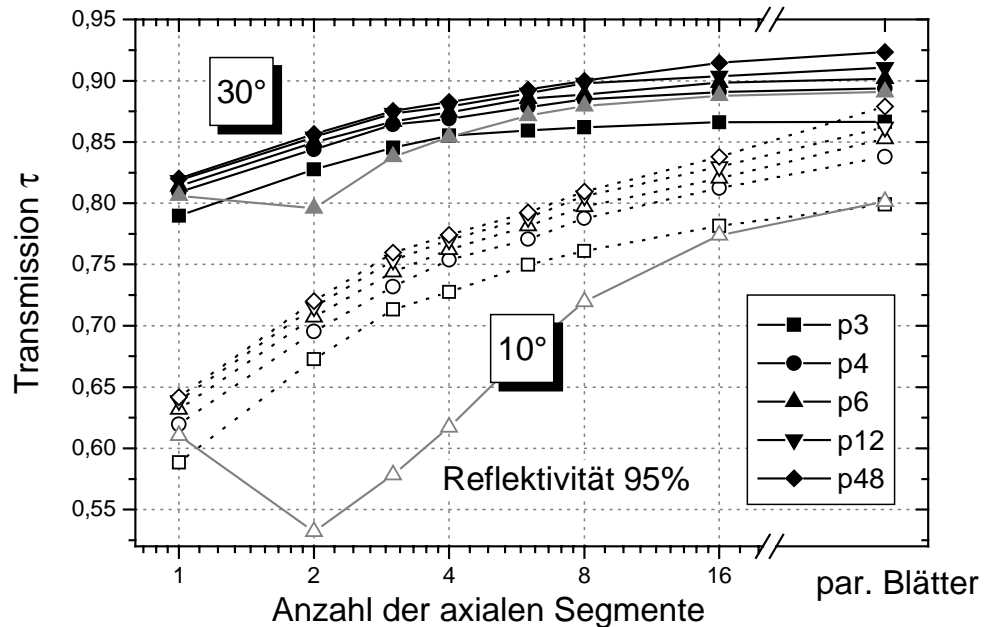


Abbildung 3-10: Transmission der optimierten Reflektoren mit 95% Reflektivität. Der halbe Öffnungswinkel der Strahlen beträgt  $10^\circ$  beziehungsweise  $30^\circ$ . Auf der Ordinate ist die Anzahl der axialen Segmente bis hin zum Grenzwert der parabolischen Blätter aufgetragen. Der Parameter innerhalb der Kurvenschar ist die Unterteilung des Querschnittes in Polygone der Ordnung 3, 4, 6, 12 oder 48. Zum Vergleich sind die Transmissionswerte für nicht optimierte Approximationen an die CPC-Form eingetragen (graue Linien), der Übersicht halber nur mit sechseckigem Querschnitt.

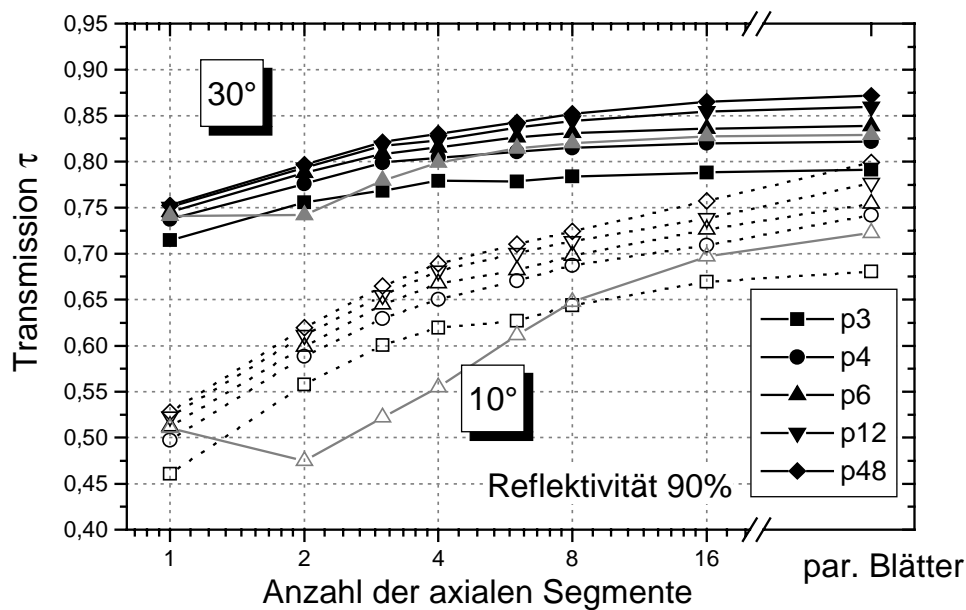


Abbildung 3-11: Wie Abbildung 3-10 für 90 % Reflektivität der spiegelnden Oberflächen.

### 3.3.5 Formen der optimierten Reflektoren

Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13 zeigen die Profile einiger optimierter Reflektoren im Vergleich zu den entsprechenden CPC-Reflektoren. Folgende Punkte sind anzumerken:

- Alle optimierten Formen weichen deutlich vom Profil des CPC-Reflektors ab. Insbesondere ist keiner der optimierten Reflektoren deutlich kürzer als ein CPC-Reflektor, die meisten sind sogar länger. Der bisher verwendete gekürzte CPC-Reflektor stellt also nicht die optimale Form dar.
- Die Reflektoren mit 95 % Reflektivität der Spiegel sind in axialer Richtung deutlich länger als jene mit 90 % Reflektivität. Für perfekte Reflektivität (100%) wären unendlich ausgedehnte Reflektoren ideale Konzentratoren. Mit zunehmender Reflektivität nähern sich die optimierten Reflektoren diesen idealen unendlich ausgedehnten Reflektoren an.
- Für gleiche Reflektivität und Öffnungswinkel läßt sich keine eindeutige Ordnung der Formen gemäß der Anzahl der axialen Segmente feststellen. Man kann beispielsweise also nicht sagen, daß die Reflektoren mit steigender Anzahl der axialen Segmente kürzer werden.
- Im Falle von vier axialen Segmenten unterliegen die axialen Ausdehnungen dieser Segmente noch der Optimierung. Man erkennt, daß die axialen Stufen dennoch alle annähernd die gleiche Länge haben. Das rechtfertigt auch die

Festlegung auf gleiche Längen für Reflektoren mit fünf oder mehr axialen Segmenten.

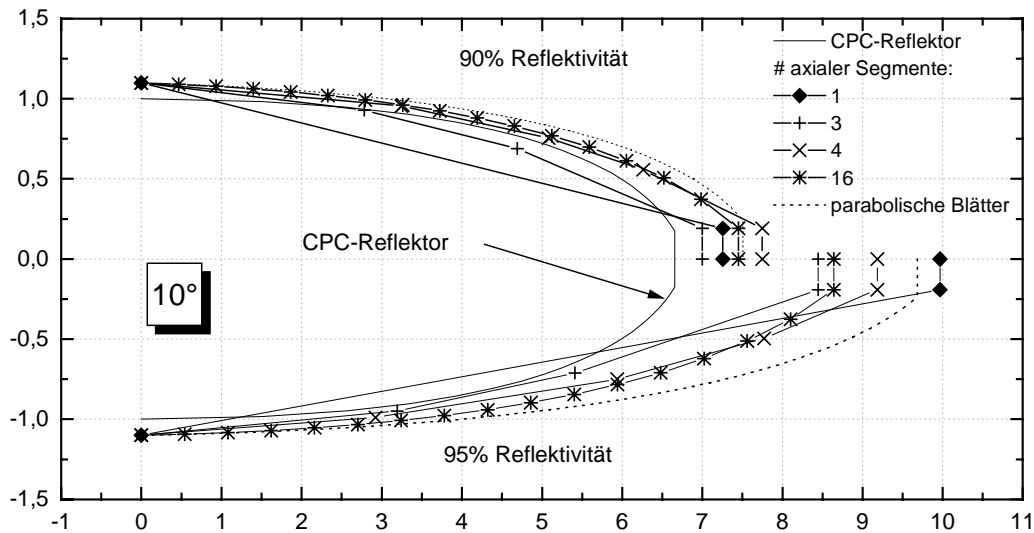


Abbildung 3-12: Schnitte durch die optimierten Reflektoren für Strahlung mit  $10^\circ$  halben Öffnungswinkel. Es sind die Profile für Reflektoren mit sechseckigem Querschnitt und 1, 3, 4 und 16 axialen Segmenten bzw. parabolischen Blättern (gepunktet) gezeigt. Zusätzlich ist das Profil eines CPC-Reflektors dargestellt. In der oberen Hälfte sind optimierte Reflektoren mit 90 % Reflektivität der Spiegel gezeigt, in der unteren solche mit 95 %. Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu. Die optische Achse verläuft horizontal. Links ist die Eintrittsapertur offen zu sehen, rechts die Austrittsapertur geschlossen. Die Eintrittsöffnung des CPC-Reflektors ist etwas kleiner, da dessen runde Eintrittsapertur dieselbe Fläche wie die sechseckige Eintrittsapertur der dargestellten optimierten Reflektoren hat.

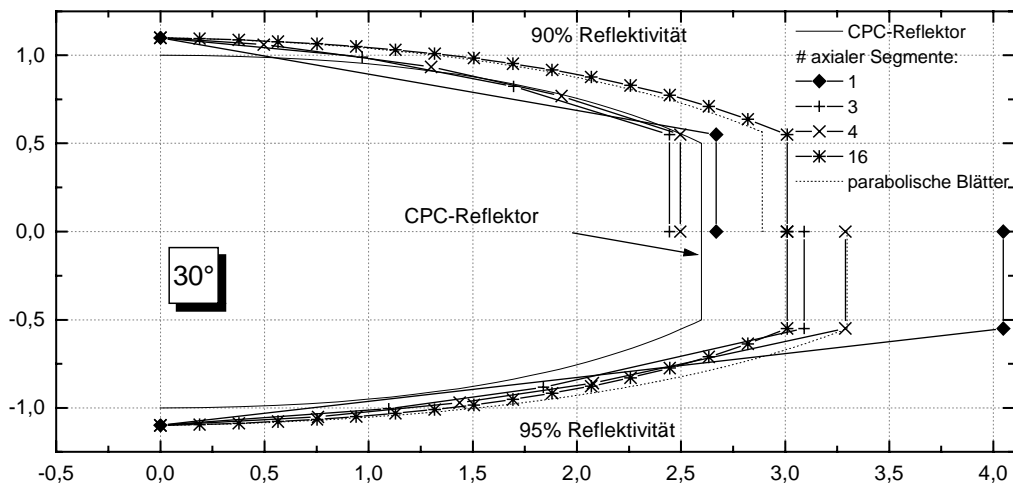


Abbildung 3-13: Schnitte durch die optimierten Reflektoren für Strahlung mit  $30^\circ$  halben Öffnungswinkel. Die Abbildung ist maßstabsgetreu. Die Eintrittsöffnung des CPC-Reflektors ist etwas kleiner, da die runde Eintrittsapertur dieselbe Fläche wie die sechseckige Eintrittsapertur der dargestellten optimierten Reflektoren hat.

### 3.3.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Optimierung lassen folgende Erkenntnisse deutlich hervortreten:

- Die Form eines Reflektors sollte in jedem Fall für die gegebenen Randbedingungen wie Reflektivität der Spiegel und Unterteilung in Facetten optimiert werden.
- Die optimierten Reflektoren weichen für unterschiedliche Randbedingungen – wie der Anzahl der Unterteilungen in Facetten oder der Reflektivität der Oberfläche – in ihrer Form deutlich voneinander ab.
- Der Vergleich der optimierten Reflektoren für verschiedene Öffnungswinkel legt nahe, daß man für kleinere Öffnungswinkel deutlich mehr axiale Segmente verwenden sollte als bei größerem Öffnungswinkel.
- Die Optimierung der Reflektorform kann deutlich beschleunigt werden, wenn man in einer ersten Stufe den Anteil der Strahlung, der erwartungsgemäß zur Austrittsapertur transmittiert wird, nicht berücksichtigt, sondern nur den Anteil der Strahlung betrachtet, in dem Strahlumkehrverluste auftreten.

## 3.4 Reflektoren für den zentralen Bereich der Fokalebene eines Heliostatenfeldes

In Abschnitt 3.2 wurde gezeigt, wie sich konische Sekundärreflektoren an die Strahlung eines vorgegebenen Heliostatenfeldes anpassen können. In diesem Abschnitt werden nun Sekundärreflektoren vorgestellt, die bei einer thermisch mehrstufigen Nutzung der Strahlung im Zentrum der Fokalebene des Heliostatenfeldes zum Einsatz kommen können. Auch hier wird Strahlung eingesetzt, die im Richtungsraum nicht rotationssymmetrisch verteilt ist. Deswegen ist zu erwarten, daß herkömmliche, rotationssymmetrische Sekundärreflektoren den neuen asymmetrischen Formen unterlegen sein werden.

Bisher ging man davon aus, daß glatte Reflektorformen üblicherweise die besten Ergebnisse erzielen. Dies wird auch durch die Ergebnisse im vorherigen Abschnitt bestätigt, wo die Transmission mit der Anzahl der Facetten hin zu glatten Formen stetig zunimmt. Deshalb wurden zuerst Reflektoren mit glatter Oberfläche und elliptischen Querschnitten untersucht. Die im nächsten Schritt untersuchten Reflektoren aus ebenen Facetten zeigten jedoch, daß ein Reflektor mit rechteckigem Querschnitt die gegebene Strahlung aus einem elliptischen Richtungsbereich deutlich besser konzentrieren kann als die Reflektoren mit glatter

Oberfläche. Diese Erkenntnis führte zu den am Ende vorgestellten Reflektoren, die senkrecht zur optischen Achse einen rechteckigen Querschnitt aufweisen und längs der Achse eindimensional gekrümmt, also aus Blättern zusammengesetzt sind.

### 3.4.1 Die Strahlung

Das Zentrum der Zielebene des Heliostatenfeldes erreicht Strahlung vom gesamten Heliostatenfeld. Die in Abschnitt 2.3 beschriebene Strahlung eines Kontinuumfeldes, dessen Abmessungen denen des Heliostatenfeldes am WIS entsprechen, dient für die in diesem Abschnitt vorgestellten Sekundärreflektoren als Strahlungsquelle. Im Zentrum der Fokalebene des Feldes variiert die Bestrahlungsstärke im Ortsraum wenig. Im Richtungsraum füllt die Strahlung die Ellipse aus, die durch die Form des Heliostatenfeldes vorgegeben ist. Die Strahlstärke innerhalb dieser Ellipse weicht um maximal 10 % vom Mittelwert ab. Diese Abweichungen sollen für den Entwurf des Reflektors nicht berücksichtigt werden. Die Form des Reflektors soll also die Ost-West- sowie die Nord-Süd-Symmetrie der Strahlung widerspiegeln.

Bisher vorgeschlagene Konzepte für Sekundärreflektoren von Solarturmkraftwerken benutzen herkömmliche Reflektorformen, die für Strahlung aus einem rotationssymmetrischen Richtungsraum konzipiert sind (s. Abschnitt 3.2). Diese Reflektoren akzeptieren also Strahlung, die im Richtungsraum einen Kreis ausfüllt und nicht eine Ellipse mit großer Exzentrizität, wie die hier vorliegende Strahlung. Bei dem Versuch, den kreisförmigen Akzeptanzbereich eines rotationssymmetrischen Reflektors an die elliptische Strahlung anzupassen, muß man zweierlei Verluste in Kauf nehmen. Vorhandene Strahlung außerhalb des Akzeptanzbereiches verringert die Transmission. Gebiete innerhalb des Akzeptanzbereiches, die nicht von Strahlung ausgefüllt werden, verdünnen die Strahlung auf der Austrittsapertur. Abbildung 3-14 verdeutlicht diese beiden Verlustmöglichkeiten.

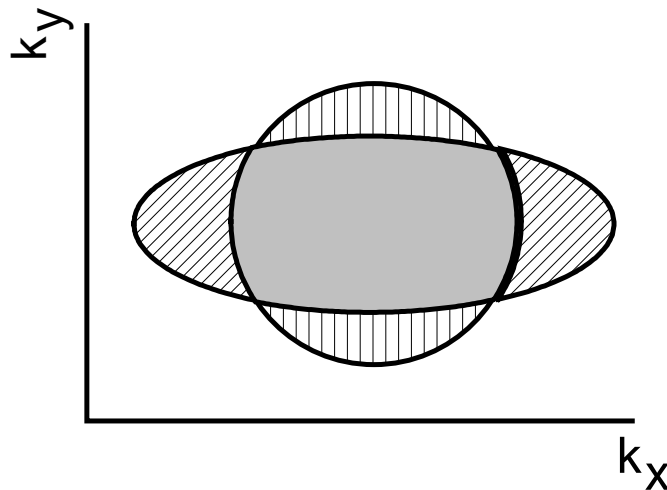


Abbildung 3-14: Versucht man Strahlung aus einer Ellipse im Richtungsraum mit einer kreisförmigen Akzeptanz abzudecken, muß man Verdünnung (senkrecht schraffiert) oder Transmissionsverluste (schräg schraffiert) in Kauf nehmen.

Die Zielvorgabe für die optimierten Sekundärreflektoren in diesem Abschnitt wird es sein, ihre Akzeptanz im Richtungsraum möglichst gut an die von der Einstrahlung ausgefüllte Ellipse anzupassen. Um das Verbesserungspotential durch die Brechung der Rotationssymmetrie aufzuzeigen, wurden für alle untersuchten Formen auch solche Varianten optimiert, die eine Strahlung aus einem rotationssymmetrischen Richtungsbereich akzeptieren. Es werden Reflektoren mit glatter, zweidimensional gekrümmter Oberfläche und solche aus ebenen und eindimensional gekrümmten Facetten vorgestellt.

### 3.4.2 Ansatz für einen Reflektor mit glatter Oberfläche

Im hier behandelten Fall fällt die Strahlung aus einem Richtungskegel mit zwei verschiedenen Öffnungswinkeln auf die Eintrittsapertur. Um diese Symmetrie wiederzugeben, wird der Reflektor aus zwei verschiedenen parabolischen Schnitten in Ost-West- beziehungsweise Nord-Süd-Richtung aufgebaut. Um einen Reflektor mit ebenen Aperturen zu erreichen, müssen beide Schnitte in Richtung der optischen Achse dieselbe Länge aufweisen (s. Abbildung 3-15).

Die parabolische Form wurde in Annäherung an den bekanntermaßen guten CPC-Reflektor gewählt. Dieser ist aus zwei parabolischen Ästen zusammengesetzt und in zwei Dimensionen ein idealer Konzentrator für Strahlung aus einem festen Richtungsbereich (Rabl 1985; Ries 1994). Bei den hier vorgestellten glatten Formen wurde die parabolische Form allerdings durch einen Bezier-Spline ersetzt. Rechnungen mit parabolischen Formen ergaben keine signifikant besseren oder schlechteren Ergebnisse.



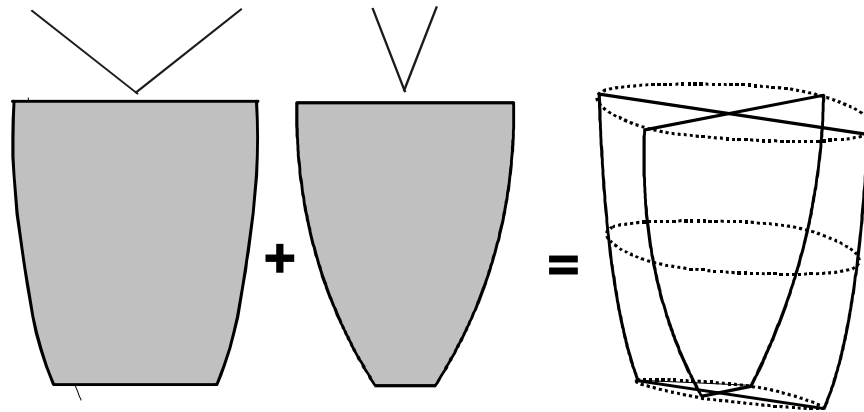


Abbildung 3-15: Der Sekundärreflektor mit glatter Oberfläche wird aus zwei verschiedenen Schnitten entworfen, die mit Ellipsen verbunden werden. Die unterschiedlichen Schnitte sollen die Auslegung auf die unterschiedlichen Öffnungswinkel der Strahlung im Nord-Süd- und Ost-West-Richtung ermöglichen. Beide Schnitte weisen dieselbe Länge in Richtung der optischen Achse auf, um ebene Ein- und Austrittsaperturen zu gewährleisten.

Die resultierende Form des SekundärReflektors hat maximal sechs freie Parameter für die Optimierung: Die Ausdehnung in Richtung der optischen Achse, die Exzentrizitäten der Ein- und Austrittsapertur, jeweils zwei Koordinaten zur Bestimmung der Form des Splines in jedem Schnitt.

Die Fläche der Eintrittsapertur ist fest vorgegeben, die Fläche der Austrittsapertur wird variiert, um eine Kennlinie zu erhalten.

Es wurden drei Grundformen untersucht:

- (a) Eine rotationssymmetrische Form mit kreisförmiger Ein- sowie Austrittsapertur,
- (b) eine asymmetrische Form mit exzentrischer Ein- und kreisförmiger Austrittsapertur,
- (c) eine asymmetrische Form mit exzentrischer Ein- und Austrittsapertur, die also alle beschriebenen Freiheitsgerade ausnutzen kann.

Die kreisförmige Austrittsapertur von Form (b) ermöglicht es, einen volumetrischen Absorber mit Druckfenster zu verwenden. Die Fenster solcher Absorber sind wegen der auftretenden Innendrucke von bis zu 20 bar als Kugelschalen oder Kegelstümpfe ausgeführt und somit auf eine kreisförmige Eintrittsapertur angewiesen (Kribus 1994; Karni 1997). Eine asymmetrische Form mit kreisförmiger Eintrittsapertur und elliptischer Austrittsapertur wurde auch untersucht. Deren Ergebnisse bleiben aber so weit hinter denen der Form (b) zurück, daß sie im weiteren nicht mehr dargestellt wird.

### 3.4.3 Kennlinien für Reflektoren mit glatter Oberfläche

Abbildung 3-16 zeigt die Kennlinien für die Reflektoren mit glatter Oberfläche. Man erkennt folgende Ergebnisse:

- Die Kennlinien für die beiden asymmetrischen Formen liegen im gesamten dargestellten Bereich deutlich oberhalb der Kennlinien für die symmetrische Form. Das heißt, sie erreichen bei gleicher Transmission deutlich höhere Konzentrationswerte und umgekehrt.
- Die asymmetrische Form mit exzentrischer Austrittsapertur erreicht nur geringfügig bessere Ergebnisse als die asymmetrische Form mit kreisförmiger Austrittsapertur.

Bei einer Transmission von 90 % erreicht die Form (b) eine um 42 % und die Form (c) eine um 45 % höhere Konzentration als die symmetrische Form (a).

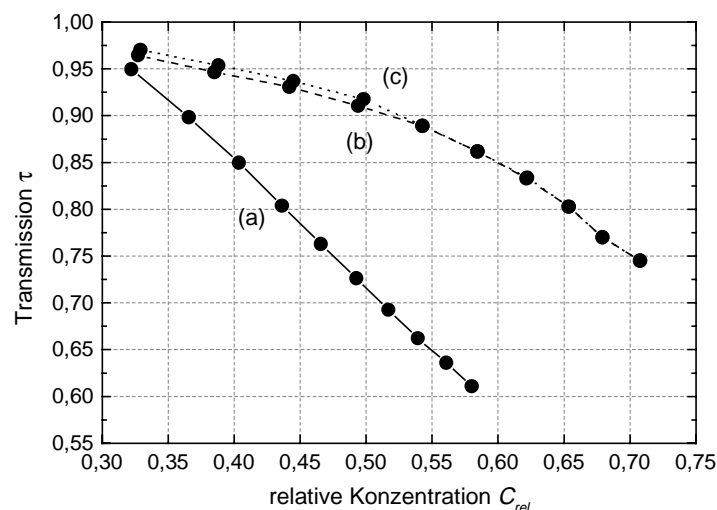


Abbildung 3-16: Kennlinien von Reflektoren mit glatter Oberfläche für die Strahlung von einem Heliostatenfeld. (a) rotationssymmetrische Form, (b) exzentrische Ein- und kreisförmige Austrittsapertur, (c) exzentrische Ein- sowie Austrittsapertur. Die Kurven (c) und (b) sind im Bereich von relativen Konzentrationen oberhalb von 0,5 deckungsgleich.

Bei der asymmetrischen Form (c) mit exzentrischer Austrittsapertur treten zwei deutlich unterschiedliche Ausformungen von Reflektoren auf. Abbildung 3-17 zeigt je einen Vertreter dieser Ausformungen. Die eine hat eine in Nord-Süd-Richtung ausgedehnte Eintrittsapertur und eine nahezu kreisförmige Austrittsapertur, diese Ausformung tritt im Bereich der Kennlinie mit höherer Transmission auf.

In Bereichen der Kennlinie mit niedrigerer Transmission haben die Reflektoren stark exzentrische Ein- sowie Austrittsaperturen, die beide in Ost-West-Richtung ausgedehnt sind.

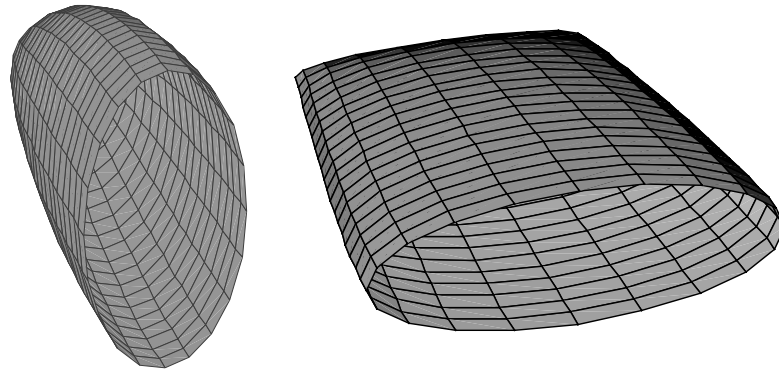


Abbildung 3-17: Zwei verschiedene Ausformungen des asymmetrischen Reflektors (c) mit exzentrischer Ein- und Austrittsapertur. Die links dargestellte Form hat eine nahezu kreisförmige Austrittsapertur und entspricht damit im Aussehen der Form (b). Die Facetten dienen hier nur zur besseren Darstellung, die Oberfläche des Reflektors in der Simulation ist glatt.

#### 3.4.4 Ansätze für Reflektoren aus ebenen Facetten

Um die Zielapertur des Heliostatenfeldes ganz oder teilweise mit mehreren gleichartigen Sekundärreflektoren füllen zu können, müssen deren Eintrittsaperturen die Form von Vierecken oder Sechsecken haben (s. Abschnitt 2.4). Dreiecke scheiden hier aus, weil die Form der Reflektoren ja die Nord-Süd- und Ost-West-Symmetrie der Strahlung wiedergeben sollen. Außerdem schließen die schlechten Ergebnisse für Reflektoren mit dreieckigen Aperturen aus Abschnitt 3.3 deren Verwendung aus.

Ausgehend von der polygonalen Eintrittsapertur kann man nun einen Reflektor aus ebenen Facetten in folgender Weise aufbauen. Man definiert weitere polygonale Aperturen, die parallel zur Eintrittsapertur sind und verbindet diese durch ebene Spiegelflächen in der Form von Dreiecken oder Trapezen. Die letzte der Aperturen bildet dann die Austrittsapertur.

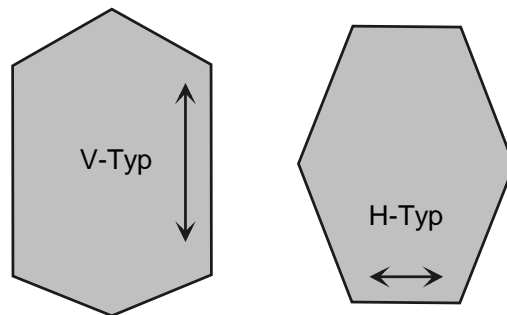


Abbildung 3-18: Es werden zwei Typen von Sechsecken charakterisiert: Der V-Typ hat zwei parallele vertikale Seiten, der H-Typ hat zwei parallele horizontale Seiten.

Das Prinzip und die Vielfalt der möglichen Formen soll am Beispiel der Reflektoren mit sechseckigen Aperturen verdeutlicht werden. Abbildung 3-18 zeigt die zwei möglichen Typen von Sechsecken mit den erforderlichen Symmetrien. Ein Sechseck mit zwei horizontalen Seiten wird als H-Typ bezeichnet, eines mit vertikalen Seiten als V-Typ. Ein Reflektor mit sechseckigen Aperturen kann mit beliebigen Kombinationen dieser Typen aufgebaut werden. Abbildung 3-19 zeigt Verbindungen zweier sechseckiger Aperturen gleichen oder verschiedenen Typs durch ebene Flächen. Diese Verbindungen sind keineswegs eindeutig, sondern willkürlich aus den möglichen ausgewählt. Ein solcher Ring von Spiegelfacetten, der zwei Aperturen verbindet wird wie in Abschnitt 3.3 als Segment bezeichnet.

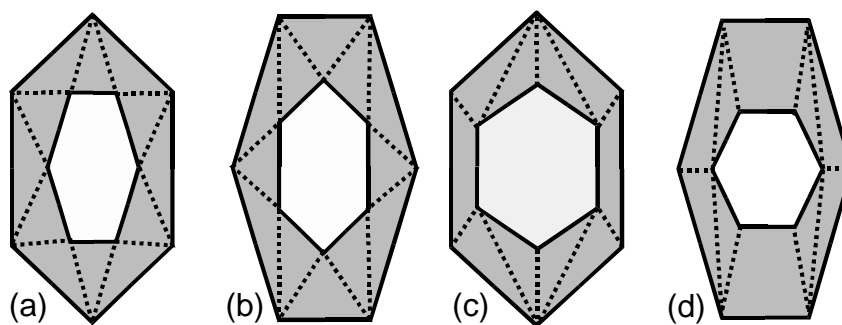


Abbildung 3-19 Verbindung von zwei sechseckigen Aperturen mit ebenen dreieckigen und trapezförmigen Flächen. Es können entweder zwei verschiedene Typen von Sechsecken miteinander verbunden werden: (a) V-Typ zu H-Typ, (b) H-Typ zu V-Typ, oder zwei gleiche Typen: (c) V-Typ zu V-Typ, (d) H-Typ zu H-Typ. Die Verbindungen zwischen zwei nicht parallelen Seiten in (c) und (d) durch Dreiecke sind nicht eindeutig. Die jeweilige Form ist willkürlich gewählt.

Die Aperturen eines Reflektors müssen nicht alle die gleiche Anzahl von Ecken haben. Man kann beispielsweise auch eine sechseckige Apertur mit einer acht- oder zwölfseitigen verbinden. Die Beschränkung auf Vierecke und Sechsecke ist ja nur bei den Eintrittsaperturen gegeben, da man mit diesen die Fokalebene lückenlos bedecken können muß.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Reflektoren mit vier- bzw. sechseckigen Aperturen untersucht. Bei den sechseckigen Formen wurden Reflektoren untersucht, die entweder nur aus Aperturen des V- oder H-Typs aufgebaut sind oder bei denen beide Typen sich abwechseln. Die Anzahl der Segmente wurde auf maximal drei beschränkt.

Entsprechend den drei Grundformen für die Reflektoren mit glatter Oberfläche wurden die optimierten Kennlinien unter drei verschiedenen Voraussetzungen ermittelt:

- (a) Eine der rotationssymmetrischen Form entsprechende mit Ein- sowie Austrittsapertur in Form regelmäßiger Polygone,
- (b) eine asymmetrische Form mit Eintrittsapertur in der Form eines unregelmäßigen und der Austrittsapertur in Form eines regelmäßigen Polygons,
- (c) eine asymmetrische Form mit Ein- und Austrittsapertur in Form unregelmäßiger Polygone.

Zwei der optimierten Reflektoren sind in Abbildung 3-20 dargestellt.

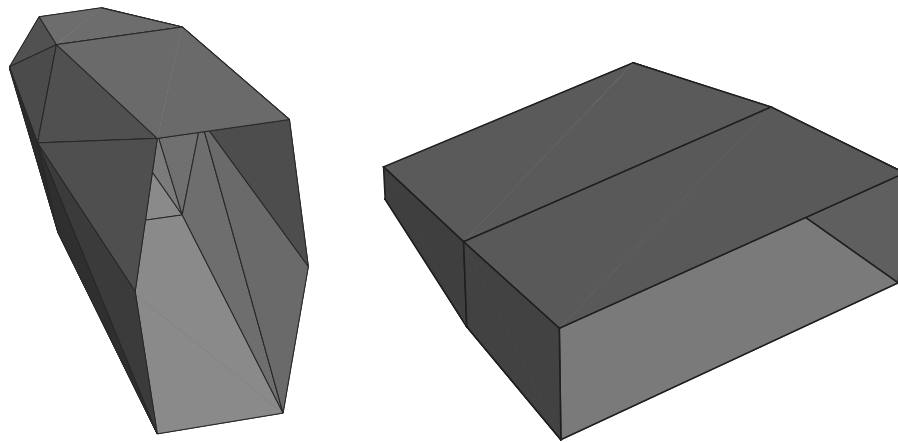


Abbildung 3-20: Zwei Reflektoren aus ebenen Facetten. Links ein Reflektor mit unregelmäßiger Ein- und regelmäßiger Austrittsapertur, der aus sechseckigen Aperturen des H-Typs aufgebaut ist. Er ist aus vier trapezförmigen und sechzehn dreieckigen Facetten zusammengesetzt. Rechts ein Reflektor mit rechteckiger Ein- und Austrittsapertur, der aus rechteckigen Aperturen aufgebaut ist. Er besteht aus acht trapezförmigen Facetten. Beide Reflektoren bestehen aus zwei axialen Segmenten.

### 3.4.5 Kennlinien für die Reflektoren aus ebenen Facetten

Abbildung 3-21 zeigt die Kennlinien für Reflektoren mit rechteckigen und sechseckigen Aperturen. Die nur aus Aperturen des H-Typs aufgebaute Form hat

sich bei den Reflektoren mit sechseckigen Aperturen durchgängig als die beste herausgestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird diese hier als einzige dargestellt. Außerdem werden nur Ergebnisse für Reflektoren mit zwei axialen Segmenten verwendet. Eine genauere Darstellung der verschiedenen untersuchten Formen und ihrer Kennlinien ist in (Timinger 1996; Walther 1998) zu finden.

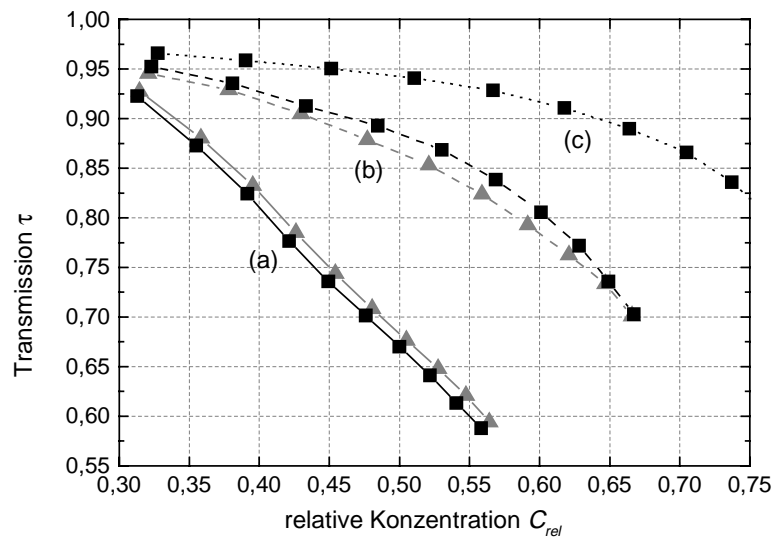


Abbildung 3-21: Kennlinien für Reflektoren aus ebenen Facetten mit rechteckigen (Dreiecke) und sechseckigen (Quadrate) Aperturen vom H-Typ (s. Abbildung 3-18). Es sind die Werte für Reflektoren mit (a) regelmäßiger Ein- und Austrittsapertur, (b) unregelmäßiger Ein- und regelmäßiger Austrittsapertur und (c) unregelmäßiger Ein- und Austrittsapertur dargestellt. Die Kennlinien für Reflektoren mit sechseckigen und rechteckigen Aperturen für Konzept (c) verlaufen im Rahmen der numerischen Fehler deckungsgleich. Deshalb ist nur die Kennlinie für die rechteckigen Reflektoren dargestellt.

Folgende Erkenntnisse sind aus den Kennlinien zu gewinnen:

- Die Formen mit unregelmäßigen Aperturen (b,c) erreichen deutlich bessere Ergebnisse als die mit regelmäßigen Aperturen (a). Dies entspricht den Ergebnissen für die Reflektoren mit glatter Oberfläche.
- Die Form mit unregelmäßiger Ein- und Austrittsapertur (c) erzielt deutliche Verbesserungen gegenüber der Form mit unregelmäßiger Ein- und regelmäßiger Austrittsapertur (b). Dies entspricht nicht den Ergebnissen für die Reflektoren mit glatter Oberfläche, wo der zusätzliche Freiheitsgrad der exzentrischen Austrittsapertur nahezu keinen Vorteil einbringt.
- Die Form (c) mit unregelmäßiger Ein- und Austrittsapertur ist hier für sechseckigen Aperturen nicht dargestellt. Sie konnte in der Optimierung an keinem Punkt der Kennlinie signifikant bessere Ergebnisse erreichen als die entsprechende Form mit rechteckigen Aperturen. Die besten gefundenen Punkte ha-

ben ihrerseits rechteckige Aperturen, die als Untermenge in den sechseckigen des H-Typs enthalten sind. Der zusätzliche Freiheitsgrad der Sechsecke gegenüber den Rechtecken wird in diesem Fall also nicht genutzt.

- Von den Reflektoren mit regelmäßiger Ein- wie Austrittsapertur erreichen die mit sechseckiger Apertur geringfügig bessere Ergebnisse als die mit rechteckigen (quadratischer) Aperturen.
- Bei den Reflektoren mit unregelmäßiger Ein- und regelmäßiger Austrittsapertur (b) erreichen die mit rechteckigen Aperturen geringfügig bessere Ergebnisse als die mit sechseckigen Aperturen
- Die maximalen Verbesserungen in der Konzentration bei 90 % Transmission für die unregelmäßigen Formen verglichen mit den regelmäßigen Formen betragen 46 % (b) bzw. 83 % (c) relativ.

Diese mit unregelmäßigen Reflektoren im Vergleich zu regelmäßigen erzielbaren Verbesserungen sind deutlich höher als bei den Reflektoren mit glatter Oberfläche. Dies hat zwei Ursachen. Einerseits erreicht die rotationssymmetrische glatte Form etwas höhere Konzentrationen bei gleicher Transmission als die regelmäßigen Formen mit facettierter Oberfläche (37 % relative Konzentration im Vergleich zu 34 % bei 90 % Transmission). Andererseits erreichen die rechteckigen Formen mit unregelmäßiger Ein- und Austrittsapertur deutlich bessere Ergebnisse als die glatten Formen mit exzentrischer Ein- und Austrittsapertur (64 % relative Konzentration im Vergleich zu 53 % bei 90 % Transmission). Die facettierten Formen sind in diesem Fall also den glatten überlegen.

Phänomenologisch ähneln die in der Optimierung gefundenen Reflektoren denen mit glatter Oberfläche aus dem vorigen Abschnitt. Die Reflektoren mit unregelmäßiger Ein- und regelmäßiger Austrittsapertur haben eine in Nord-Süd-Richtung ausgedehnte Eintrittsapertur. Bei den Reflektoren mit unregelmäßiger Ein- und Austrittsapertur sind beide Aperturen deutlich in Ost-West-Richtung ausgedehnt (Abbildung 3-20). Dieselbe Beobachtung kann man bei den Reflektoren mit glatter Oberfläche machen (Abbildung 3-17).

#### **3.4.6 Ansatz für einen Reflektor aus eindimensional gekrümmten Elementen**

Die im letzten Abschnitt vorgestellten Reflektoren mit rechteckiger Ein- und Austrittsapertur sind den vorher behandelten glatten Formen mit elliptischen Aperturen deutlich überlegen. Die Aufteilung in Facetten entlang der optischen Achse scheint jedoch von Nachteil zu sein. Dies wird von der Tatsache nahege-

legt, daß die Ergebnisse besser werden, je mehr Segmente, also Unterteilungen entlang der optischen Achse, man zuläßt (Walther 1998). Der Grenzfall von unendlich vielen axialen Segmenten führt zu eindimensional gekrümmten Flächen und kann, wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, deutliche Verbesserungen im Vergleich zu flachen Facetten erzielen.

Abbildung 3-22 zeigt einen Reflektor aus eindimensional gekrümmten Flächen mit rechteckiger Ein- und Austrittsapertur. Jeder Schnitt des Reflektors mit einer Ebene senkrecht zur optischen Achse ist ein Rechteck. Das Profil der Krümmung wird in einer Ebene senkrecht zur Kante eines solchen Rechteckes als Parabel beschrieben. Um der oben beschriebenen Ost-West- und Nord-Süd-Symmetrie zu genügen, haben gegenüberliegende Flächen das gleiche Krümmungsprofil.

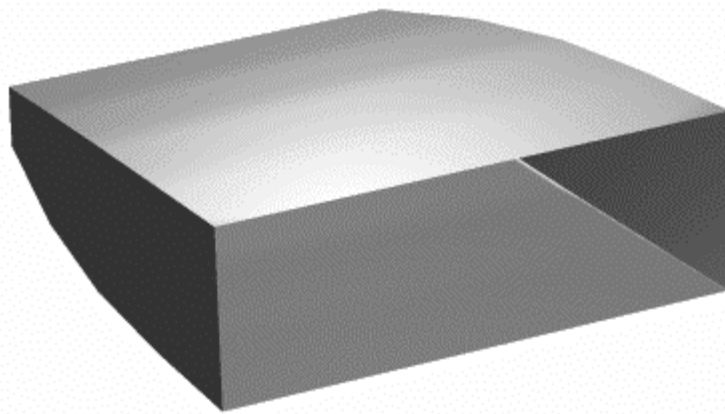


Abbildung 3-22: Sekundärreflektor aus eindimensional gekrümmten Flächen mit rechteckiger Ein- und Austrittsapertur. Man erkennt die eindimensionale Krümmung Facetten des Reflektors.

#### 3.4.7 Ergebnisse für Reflektoren aus eindimensional gekrümmten Elementen

Abbildung 3-23 zeigt die Kennlinien für Reflektoren aus eindimensional gekrümmten Elementen mit rechteckigen Aperturen. Man kann folgende Ergebnisse ablesen:

- Die Kennlinien für die unregelmäßigen Formen (b, c) liegen deutlich oberhalb der Kennlinie für die regelmäßige Form (a).



- Die relativen Verbesserungen in der Konzentration für die asymmetrischen Formen gegenüber den symmetrischen betragen hier 64% (b) bzw. 137 % (c) bei 90 % Transmission.

Dies ist die deutlichste Verbesserung aller bisher vorgestellter Konzepte.

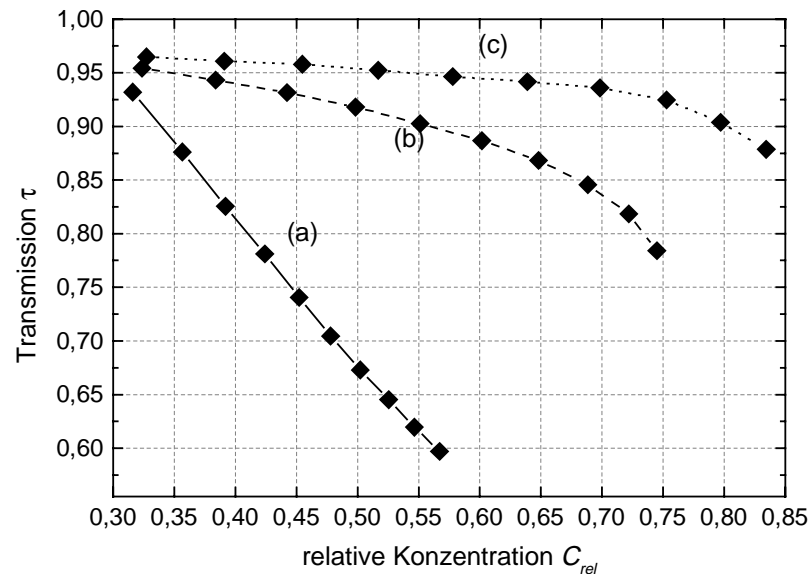


Abbildung 3-23: Kennlinien für Reflektoren aus eindimensional gekrümmten Elementen mit rechteckigen Aperturen: (a) Regelmäßige (quadratische) Ein- und Austrittsapertur, (b) unregelmäßige Ein- und regelmäßige Austrittsapertur, (c) unregelmäßige Ein- und Austrittsapertur.

### 3.4.8 Vergleich der verschiedenen Reflektorformen

Folgenden Konzepte von Sekundärreflektoren für Strahlung aus einem elliptischen Richtungsraum wurden anhand von Strahlung im Zentrum der Zielapertur eines experimentellen Heliostatenfeldes optimiert und verglichen:

- Reflektoren mit glatter Oberfläche und elliptischen Querschnitt,
- Reflektoren aus ebenen Facetten mit sechseckigen und rechteckigen Aperturen,
- Reflektoren aus eindimensional gekrümmten Elementen mit rechteckigem Querschnitt.

Die Reflektoren mit glatter Oberfläche eignen sich nicht zur parallelen Anordnung in der Zielapertur des Heliostatenfeldes (Parkettierung). Sie wurden hier vor allem zur Potentialabschätzung betrachtet. Dieser Rolle werden sie nur für die rotationssymmetrischen bzw. regelmäßigen Formen (a) gerecht, da bei den unregelmäßigen Reflektoren die mit rechteckigem Querschnitt erheblich bessere

Ergebnisse erzielen. Dies zeigt der direkte Vergleich der Konzepte und Formen in Abbildung 3-24. Bei den unregelmäßigen bzw. exzentrischen Reflektorformen (b, c) werden die besten Ergebnisse jeweils von den Reflektoren aus eindimensional gekrümmten Facetten mit rechteckigem Querschnitt erzielt. Die Kennlinien für Reflektoren mit sechseckigen Aperturen sind hier der Übersicht halber nicht dargestellt. Sie werden von den Kennlinien für Reflektoren mit rechteckigem Querschnitt übertroffen.

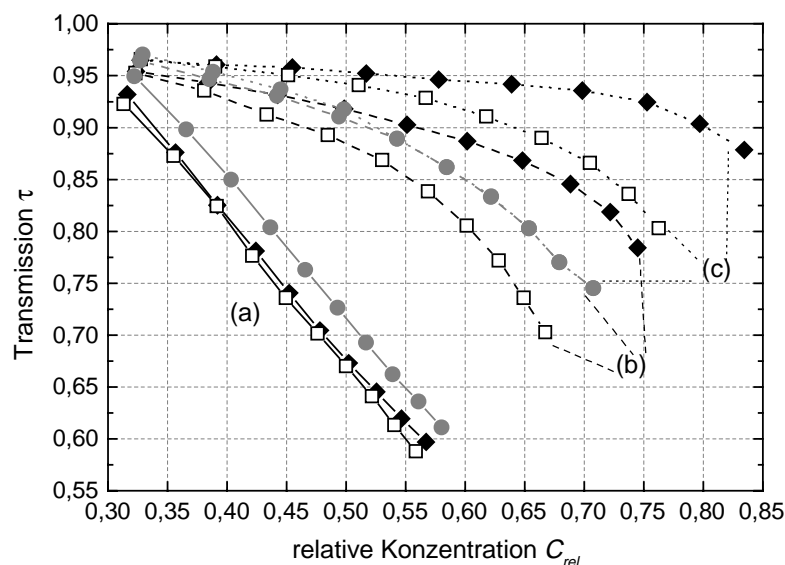


Abbildung 3-24: Kennlinien für verschiedene Reflektorformen: Reflektoren mit glatter Oberfläche (Kreise), Reflektoren aus ebenen Facetten mit rechteckigem Querschnitt und zwei axialen Segmenten (Quadrate) und Reflektoren aus eindimensional gekrümmten Facetten mit rechteckigem Querschnitt (Diamanten). Es sind drei Konzepte dargestellt: (a) regelmäßige bzw. kreisförmige Ein- und Austrittsapertur, (b) unregelmäßige bzw. exzentrische Ein- und regelmäßige bzw. kreisförmige Austrittsapertur, (c) unregelmäßige bzw. exzentrische Ein- und Austrittsapertur. Für die Reflektoren mit glatter Oberfläche und elliptischen Querschnitten sind die Kennlinien für die Konzepte (b) und (c) fast deckungsgleich.

Für den hier behandelten Fall des – angenäherten – experimentellen Helio-statenfeldes kann die Konzentration in der Austrittsapertur durch Verwendung eines nicht regelmäßigen Reflektors bei 90 % Transmission um 137% gesteigert werden.

Der Reflektor, der diese Verbesserung erreicht, hat eine langgezogene, rechteckige Austrittsapertur (s. Abbildung 3-20, rechts). Er ist deswegen nicht gut für vorliegende Konzepte von Hochdruck-Absorbern geeignet, die die Strahlung durch ein Fenster mit kreisrunder Apertur eintreten lassen. Wenn diese die gesamte Strahlung aus der rechteckigen Apertur des Reflektors aufnehmen soll, entstehen große nicht ausgeleuchtete Bereiche, die gegen Verluste durch Abstrah-

lung und Wärmeleitung isoliert werden müssen (s. Abbildung 3-25). Dasselbe gilt in abgeschwächter Form auch für die Reflektoren mit regelmäßig rechteckiger, also quadratischer Austrittsapertur. Die Verlustfläche beträgt in diesem Fall 18 %. Die Entwicklung leistungsfähiger Isolationskonzepte oder neuer Fenstergeometrien wird den praktischen Nutzen des Vorteils der vorgestellten unregelmäßigen Reflektorformen entscheidend beeinflussen.

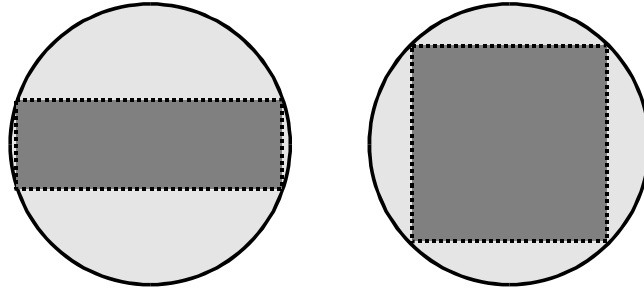


Abbildung 3-25: Wenn Strahlung von einer rechteckigen oder quadratischen Austrittsapertur eines Reflektors an die kreisförmige Eintrittsapertur eines Absorbers übergeben wird, entstehen auf der Absorbereintrittsapertur nicht ausgeleuchtete Bereiche (grau), die gegen Verluste durch Abstrahlung und Wärmeleitung isoliert werden müssen.

### 3.5 Reflektoren für homogene Strahlung aus einem elliptischen Richtungsbereich

Die in Abschnitt 3.4 vorgestellten Sekundärreflektoren für das Zentrum der Fokalebene eines Heliostatenfeldes sind für Strahlung entworfen, die aus einem Richtungskegel mit zwei verschiedenen Öffnungswinkeln auf ihre Eingangsapertur fällt. Auf die inhomogene Verteilung der einfallenden Strahlung im Ortsraum wurde beim Entwurf der Reflektoren keine Rücksicht genommen, bei den Strahlverfolgungsrechnungen natürlich sehr wohl.

Die Reflektoren haben sich für die Strahlung des Heliostatenfeldes am WIS als sehr gut geeignet erwiesen. Um diese Anpassungsfähigkeit an die zur Verfügung gestellte Strahlung auf einer allgemeineren Basis zu überprüfen, wurden die Reflektoren mit rechteckigem Querschnitt für unterschiedliche Strahlungsverhältnisse optimiert.

#### 3.5.1 Die Einstrahlung

Die im folgenden betrachtete Einstrahlung ist über die Eintrittsapertur der Reflektoren homogen verteilt. Im Richtungsraum füllt die Strahlung eine Ellipse homogen aus. Die Fläche dieser Ellipse und deren Exzentrizität wurden variiert.

Die Halbachsen der Ellipse entsprechen den Sinus der halben Öffnungswinkel der Strahlungskegel auf jedem Punkt der Apertur  $\sin\theta_x$  und  $\sin\theta_y$  (Abbildung 3-26). Für die maximal erreichbare Konzentration für diese Strahlung gilt also:

$$C_{\max} = \frac{n^2}{\sin\theta_x \cdot \sin\theta_y} . \quad (3.1)$$

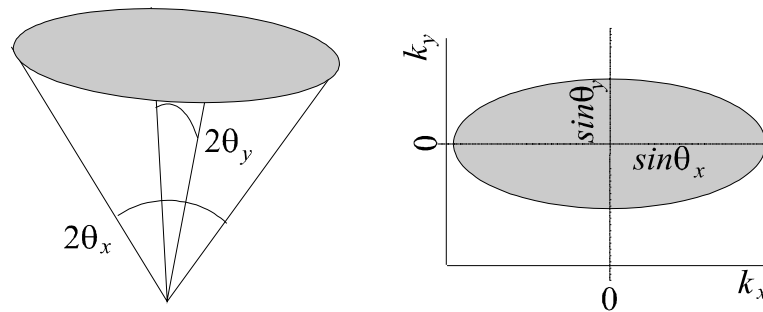


Abbildung 3-26: Die Strahlung kommt aus einem Richtungskegel mit verschiedenen Öffnungswinkeln. Im Richtungsraum füllt die Strahlung eine Ellipse mit Halbachsen  $\sin\theta_x$  und  $\sin\theta_y$  aus.

Die Richtungsexzentrizität  $\varepsilon = \sin\theta_x / \sin\theta_y$  wurde unter den Werten 1.0, 2.0 und 3.0 variiert. Die halben mittleren Öffnungswinkel  $\langle\theta\rangle = \sqrt{\sin\theta_x \cdot \sin\theta_y}$  der Strahlungskegel betragen 30.0 °, 25.0 °, 21.6 ° und 12.0 °. Die betrachteten Werte für  $C_{\max}$  betragen dementsprechend 4.0, 5.6, 7.4 und 23.1 .

### 3.5.2 Reflektorformen

Im folgenden werden Ergebnisse für Reflektoren mit rechteckigem Querschnitt dargestellt, die aus eindimensional gekrümmten Facetten zusammengesetzt sind. Die ebenfalls berechneten Formen aus ebenen Facetten erreichen bei gleicher Konzentration deutlich geringere Transmissionswerte und werden aus Gründen der Übersicht hier nicht weiter dargestellt.

Für Strahlung mit Richtungsexzentrizität 1.0 wurden Reflektoren mit quadratischer Ein- und Austrittsapertur verwendet. Für Richtungsexzentrizitäten größer 1 wurden Reflektoren mit rechteckiger Ein- und quadratischer oder rechteckiger Austrittsapertur betrachtet. Die quadratischen Austrittsaperturen lassen sich besser an Absorber mit kreisförmiger Eintrittsapertur anpassen als rechteckige.

Für die hier behandelte Einstrahlung wurden bisher von verschiedener Seite Reflektoren mit quadratischen oder rechteckigen Aperturen vorgeschlagen (Rabl 1976; Molledo 1984; Brunotte 1996; Brunotte 1996). Diese Reflektoren sind als gekreuzte CPC-Reflektoren aufgebaut, die Facetten haben also das Profil eines

zweidimensionalen CPC-Reflektors (s. Abschnitt 1.2.2). Für Richtungssexzentrizitäten größer 1 werden zwei verschiedene CPC-Profile mit unterschiedlichem nominellen Öffnungswinkel benötigt, die unterschiedlich lang sind. Das längere wird dann auf der Seite der Eintrittsapertur entsprechend gekürzt. Diese Reflektoren sind weder in ihrer Form optimiert, noch wurden Kennlinien berechnet. Es werden auch deutlich geringere Transmissionswerte erreicht, als bei den hier vorgestellten optimierten Formen.

### 3.5.3 Ergebnisse

Abbildung 3-27 und Abbildung 3-28 zeigen die Kennlinienscharen für zwei verschiedene mittlere Öffnungswinkel und verschiedene Richtungssexzentrizitäten.

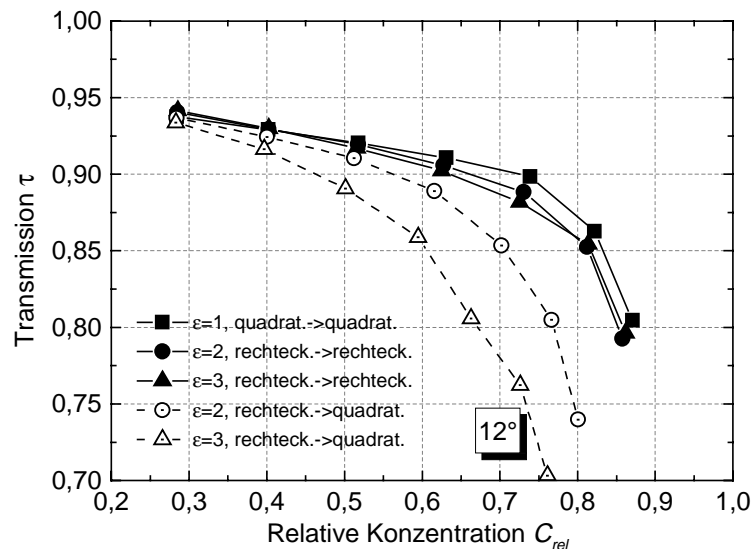
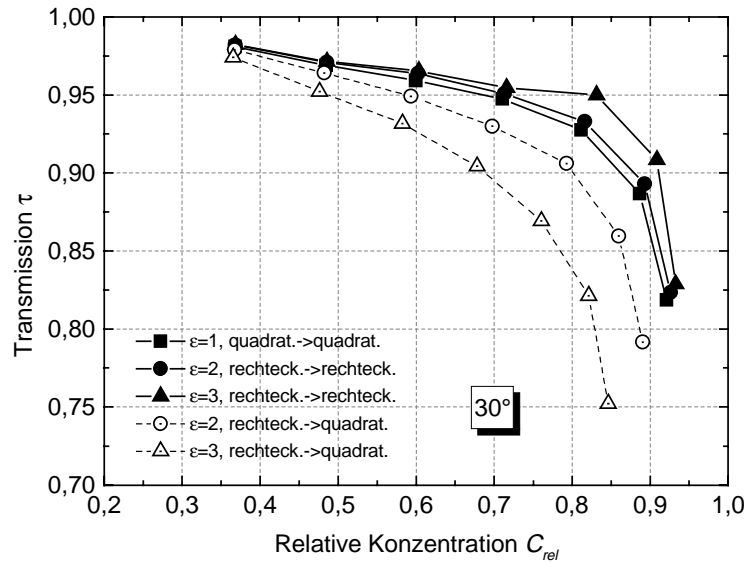


Abbildung 3-27: Kennlinienscharen für Reflektoren aus eindimensional parabolisch gekrümmten Facetten für Strahlung mit konstanten mittleren Öffnungswinkel  $\langle \theta \rangle = 12.0^\circ$ . Für rotationssymmetrische Strahlung ( $\epsilon = 1$ ) wurden Reflektoren mit quadratischer Ein- und Austrittsapertur optimiert. Für Strahlung mit asymmetrischer Verteilung im Richtungsraum ( $\epsilon > 1$ ) wurden Reflektoren mit rechteckiger Ein- und Austrittsapertur sowie Reflektoren mit rechteckiger Ein- und quadratischer Austrittsapertur optimiert.

Abbildung 3-28: Wie Abbildung 3-27 mit  $\langle \theta \rangle = 30^\circ$ 

Im Vergleich der Kennlinien fallen folgende Regelmäßigkeiten auf:

- Die erreichbare Transmission bei gleicher relativer Konzentration sinkt mit abnehmendem mittleren Öffnungswinkel der Strahlung. Ein kleinerer Öffnungswinkel bedeutet einen höheren Wert für  $C_{max}$  und damit im allgemeinen auch eine höhere Anzahl von Reflexionen pro Strahl (Rabl 1976; Yehezkel 1993). Dadurch kommen höhere Verluste durch nicht perfekte Reflektivität (95%) zustande.
- Die Reflektoren mit quadratischer Austrittsapertur erreichen bei exzentrischer Strahlung deutlich geringere Transmission als die Reflektoren mit rechteckiger Austrittsapertur. Diese Beobachtung entspricht den Ergebnissen für die Strahlung des Heliostatenfeldes am WIS (Abschnitt 3.4).
- Für die Reflektoren mit quadratischer Austrittsapertur sinkt die Transmission mit zunehmender Exzentrizität der Strahlung. Dies gilt unabhängig vom mittleren Öffnungswinkel.
- Eine vergleichbare Aussage für Reflektoren mit rechteckiger Austrittsapertur läßt sich nicht treffen. Für kleinere mittlere Öffnungswinkel sinkt die Transmission mit zunehmender Richtungsexzentrizität, für größere mittlere Öffnungswinkel steigt die Transmission mit zunehmender Richtungsexzentrizität.

Für die Reflektoren mit rechteckiger Austrittsapertur betragen die Unterschiede in der Transmission für verschiedene Richtungsexzentrizitäten maximal 3% absolut. Bezieht man noch die uneinheitliche Abhängigkeit von der Rich-

tungsexzentrizität ein, kommt man zu dem Schluß, daß die Transmission näherungsweise unabhängig von der Richtungsexzentrizität angenommen werden kann. Letztere kann für die Anwendung folglich nach anderen Kriterien gewählt werden.

Wenn man sich auf eine quadratische Austrittsapertur festlegt, gilt diese Aussage nicht. In diesem Fall verliert man mit zunehmender Richtungsexzentrizität an Transmission. Man muß also in diesem Fall bei der Anwendung eventuelle Vorteile einer Quelle mit exzentrischer Richtungscharakteristik gegen die resultierenden Verluste bei der Transmission abwägen.





---

## 4 Messungen an einem Sekundärreflektor mit rechteckigem Querschnitt

*Am WIS wurde ein Reflektor mit rechteckigen Aperturen aus ebenen Facetten angefertigt. Der Entwurf dieses Reflektors ging aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Optimierungen hervor. Die in den Abschnitten 3.4.4 und 3.4.5 vorgestellten Reflektoren sind für das Labor im neunten Stock des Turmes am Heliostatenfeld des WIS ausgelegt. Dieser Reflektor wurde konstruiert und in einen Meßstand in diesem Labor integriert. An diesem Reflektor wurden zwei Arten von Messungen durchgeführt. Ziel der Messungen waren einerseits die Verifizierung der Strahlverfolgungsrechnungen. Andererseits sollten die Einflüsse von Abweichungen des Reflektors von der vorgegebenen Form dargestellt und bewertet werden.*

*Eine neuartige optische Meßmethode wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Mit fotografischen Aufnahmen kann man die Transmission durch einen nichtabbildenden Reflektor mit vierdimensionaler Auflösung ermitteln. Hierfür wird der eigentliche Strahlweg umgekehrt und eine Lichtquelle in die Austrittsapertur des Reflektors gebracht. Ein Beobachter sieht dann durch die Eintrittsapertur Strahlung, die mit umgekehrter Richtung von ihm auch die Austrittsapertur erreichen würde. Die entstehenden Transmissionsmuster können mit Strahlverfolgungsrechnungen verglichen werden.*

*Die optischen Messungen wurden an dem Reflektor während eines Aufenthalts am WIS durchgeführt. Die Transmission wurde vom Heliostatenfeld aus gemessen. In Kombination mit Strahlverfolgungsrechnungen konnten die Abmessungen und die Ausrichtung des Reflektors im bestehenden Aufbau mit hoher Genauigkeit reproduziert bzw. bestimmt werden.*

*Außerdem wurden kalorimetrische Messungen zur Bestimmung der Transmission von Strahlung von einzelnen Heliostaten durchgeführt. Die Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Eintrittsaperturebene des Reflektors wurde mit im Aufbau integrierten Radiometern bestimmt, wobei das Bild der Sonne schrittweise verfahren wurde. Die Leistung der Strahlung, die den Reflektor durch die Austrittsapertur verläßt, wurde in einem Kalorimeter gemessen. Der Quotient aus Strahlungsleistung auf der Eintrittsapertur und im Kalorimeter absorbierte Leistung bestimmt die Transmission durch den Reflektor. Dieser Wert konnte für fünf Heliostaten mit einer relativen Genauigkeit von 20% bestimmt werden. Der große Fehler resultiert in erster Linie aus einer nicht zu reproduzierenden Veränderung der Bestrahlungsstärkeverteilung während der Messung aufgrund der Bewegung der Sonne am Himmel. Weitere Fehler stammen von der Kalibrierung der Radiometer und der Messung der Reflektivität der*

*Spiegel. Im Rahmen dieser Fehlergrenzen stimmen die gemessenen Transmissionswerte befriedigend mit Strahlverfolgungsrechnungen überein. Die hohe Genauigkeit der optischen Messungen lässt sich mit der kalorimetrischen Methode nicht erreichen.*

## 4.1 Der Reflektor

### 4.1.1 Abmessungen des Reflektors

Der Reflektor hat zwei axiale Segmente und rechteckige Aperturen. Folglich ist er aus acht trapezförmigen Facetten zusammengesetzt. Die genauen Abmessungen der Facetten sind Ergebnis der Optimierungsrechnungen (s. Abschnitt 3.4.5). In den Strahlverfolgungsrechnungen kann eine Spiegelfläche als unendlich dünn angesehen werden. Deswegen beziehen sich die hier angegebenen Maße alle auf die Spiegelloberfläche. Abbildung 4-1 zeigt den Reflektor schematisch und erklärt die Bezeichnungen der Maße.

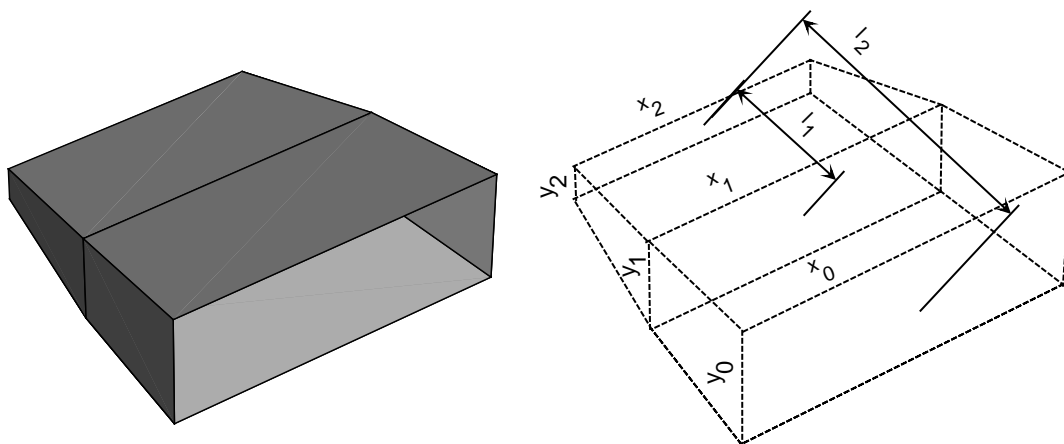


Abbildung 4-1: Abmessungen des rechteckigen Reflektors. Der Index 0 bezieht sich auf die Eintrittsapertur, 1 auf die Zwischenapertur und 2 auf die Austrittsapertur. Die y-Werte geben die vertikale Ausdehnung der Aperturen an, die x-Werte die horizontalen.

In Tabelle 4-1 sind die Abmessungen des Reflektors aufgelistet. In der ersten Spalte finden sich die Vorgabewerte entsprechend den Ergebnissen der Optimierung. Die Werte der zweiten Spalte sind aus den Abmessungen der einzelnen Facetten berechnet. Diese Messung wurde vorgenommen, bevor der Reflektor zusammengesetzt wurde. Die Werte der dritten Spalte wurden vom fertig zusammengesetzten Reflektor genommen. Die Vorgaben wurden bei der Konstruktion innerhalb einer Fertigungstoleranz von 1 mm weitgehend eingehalten. Die Werte für die axialen Längen der Segmente  $l_1$  und  $l_2 - l_1$  weichen jedoch deutlich von den Vorgaben ab, wohingegen die gesamte axiale Länge des Reflektors  $l_2$  wiederum

gut mit der Vorgabe übereinstimmt. Eine Verwechslung der axialen Längen der einzelnen Segmente bei der Konstruktion scheint naheliegend.

	Vorgaben	Messung der einzelnen Facetten ( $\pm 0.5$ mm)	Messung des zusammengesetzten Reflektors ( $\pm 0.2$ mm)
x0	474.7	475.8	474.8
y0	169.4	170.5	170.8
x1	430.2	431.4	nicht zugänglich
y1	131.4	132.1	nicht zugänglich
x2	354.3	356.3	356.3
y2	50.5	51.8	51.4
l1	207.6	211.5	$212.4 \pm 1.5$
l2 (l2-l1)	419.6 (212.0)	419.9 (208.4)	$419.2 (206.8 \pm 1.5)$

Tabelle 4-1: Abmessungen des Reflektors entsprechend den vorgegebenen Werten und den Ergebnissen zweier Messungen. Alle Maße sind in Millimeter angegeben. Die Bezeichnungen sind Abbildung 4-1 entnommen.

#### 4.1.2 Technischer Aufbau des Reflektors

Die acht Facetten des Reflektors wurden aus zehn Millimeter dickem Aluminiumblech gefertigt. Diese Facetten weisen auf der einen Seite, die beim zusammengesetzten Reflektor innen liegt, die im letzten Abschnitt angegebenen Maße auf.

Auf diese Innenseiten wurden mit einer Klebefolie die eigentlichen Spiegel aufgebracht. Es wurden Silber-hinter-Glas-Spiegel mit einer Stärke von 0.5 mm verwendet. Die Reflektivität der Spiegel wurde zu  $80 \% \pm 3 \%$  bestimmt.

Auf Höhe der Zwischenapertur des Reflektors sind alle Facetten mittels passender Klemmen an einem rechteckigen Rahmen befestigt. Dieser Rahmen trägt den gesamten Reflektor. Außerdem sind die Facetten an den Ecken der Ein- und Austrittsapertur miteinander verbunden. Die Facetten passen gut zueinander, es entstehen keine sichtbaren Spalte zwischen den Facetten beim zusammengesetzten Reflektor. Das führt auch zu der guten Übereinstimmung der Maße, die einerseits von den einzelnen Facetten genommen wurden, andererseits vom zusammengesetzten Reflektor (Tabelle 4-1, Spalten 2 und 3). Schlecht passende Facetten würden zu Spalten und dadurch zu bemerkbar größeren Abmessungen des zusammengesetzten Reflektors führen.

Die geringe Absorption bei der Reflexion und an schadhafte Spiegelstellen oder Spalten zwischen den Spiegeln kann unter der vom Heliostatenfeld konzen-

trierten Sonnenstrahlung ausreichen, den Reflektor zu überhitzen. Deswegen wurde eine Wasserkühlung für den Reflektor vorgesehen. Auf der Rückseite der Facetten sind mit wärmeleitendem Epoxidharz Kühlschlangen aus Kupferrohr angebracht.

#### 4.1.3 Der Laboraufbau

Die Messungen am Reflektor wurden in einem Labor im neunten Stock des Turmes am WIS durchgeführt. Hierfür wurde ein Meßstand angefertigt. Abbildung 4-2 zeigt eine schematische Zeichnung des Meßstandes. Die zum Heliostatenfeld ausgerichtete Frontplatte ist mit einem Strahlungsschild versehen. Die Frontplatte ist zum Heliostatenfeld hin geneigt. Der Winkel zur Senkrechten beträgt etwa  $23^\circ$ . Der Strahlungsschild besteht aus hitzebeständigem Material und ist mit weißer Farbe bestrichen. Er schützt so die hinter ihm liegenden Bauteile und die Experimentatoren auf der Arbeitsplattform vor der konzentrierten Strahlung vom Heliostatenfeld, ohne selbst überhitzt zu werden.

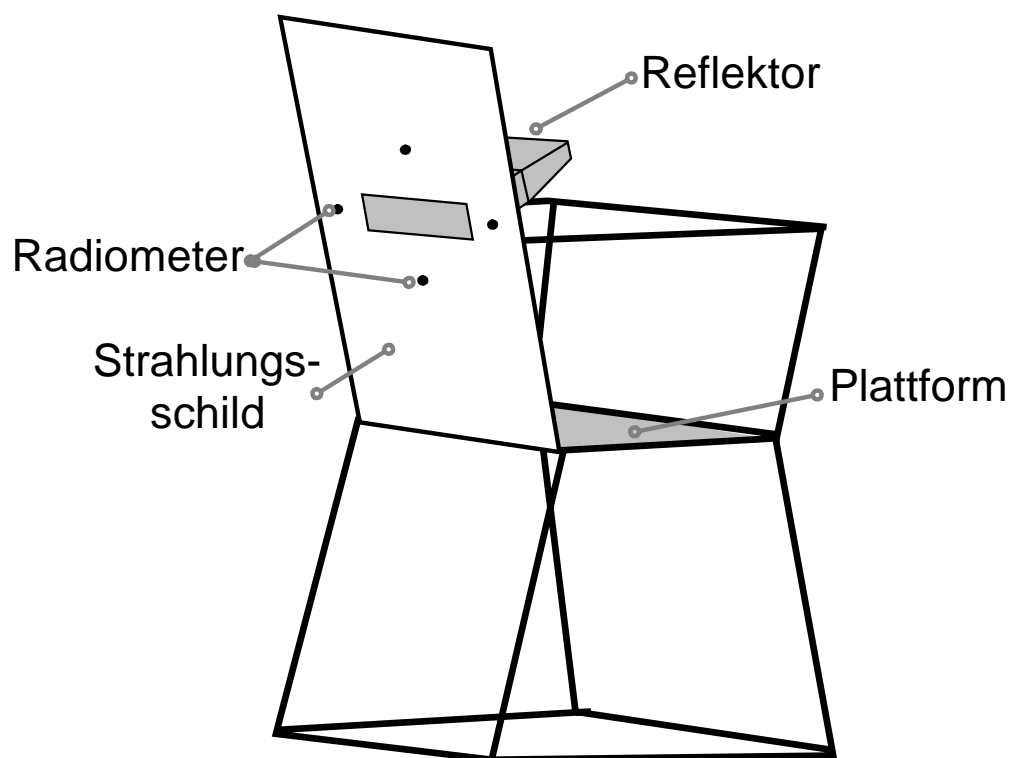


Abbildung 4-2: Meßstand im Labor im neunten Stock des Turmes am WIS.

Im Zentrum der Frontplatte ist der Reflektor montiert. Ihn umgeben auf allen vier Seiten Radiometer, die im gleichen Abstand von der Mitte der Eintrittsapertur

tur des Reflektors angebracht sind. Sie dienen der Messung der Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Eintrittsapertur bei den kalorimetrischen Messungen.

Der Reflektor und die Radiometer sind wassergekühlt. Die Temperaturen der Radiometer werden während der Messungen unter konzentrierter Sonnenstrahlung zusätzlich überwacht, um Überhitzung auszuschließen. An der Austrittsapertur des Reflektors kann ein mit Wasser gekühltes Kalorimeter angebracht werden. Die Kühlwasserkreisläufe werden mit Durchfluß-Schaltern überwacht. Der Übersichtlichkeit halber werden in Abbildung 4-2 die Kühlwasserkreisläufe und das Kalorimeter nicht gezeigt.

#### 4.1.4 Strahlverfolgungsrechnungen

Die Transmission von Strahlung durch den Reflektor in Abhängigkeit vom Ort auf dem Heliostatenfeld wurde mittels Strahlverfolgung berechnet. Die Form des Reflektors entspricht den gemessenen Werten in Tabelle 4-1. Es wurde eine Reflektivität der verwendeten Spiegel von 95 % angenommen. Abbildung 4-3 zeigt das Heliostatenfeld und die berechnete Transmission in Höhengschichtlinien.

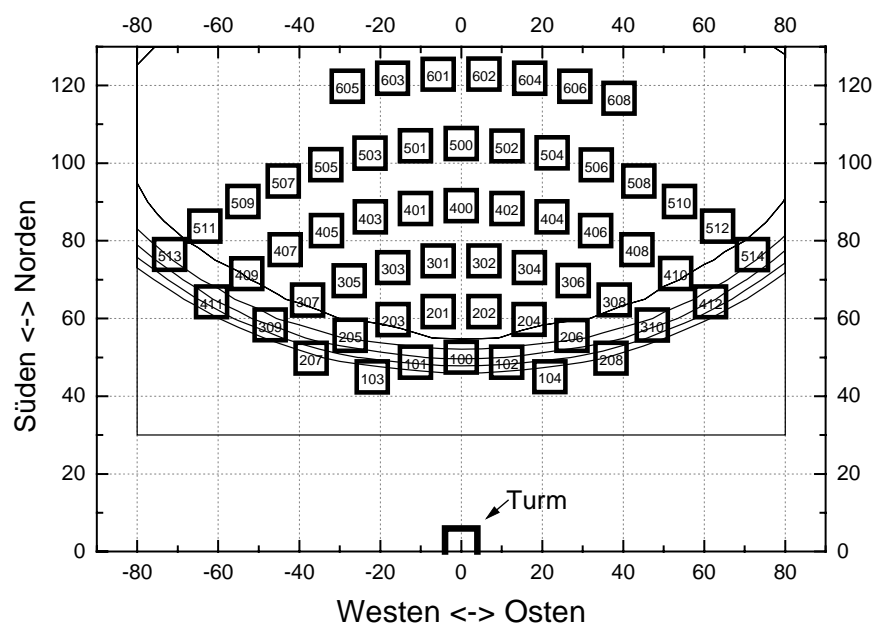


Abbildung 4-3: Berechnete Transmission von Strahlung vom Heliostatenfeld durch den Reflektor. Man blickt senkrecht von oben auf das Heliostatenfeld. Die Rechtecke bezeichnen die einzelnen Heliostaten mit ihrer Benennung. Es sind Höhengschichtlinien für 50%, 60%, 70%, 80% und 90% Transmission eingetragen. Die Maßeinheit ist 1 Meter.

Man erkennt, daß die Transmission am Südrand des Feldes innerhalb von etwa 10 m von 90% auf 50% abfällt. Dieser scharfe Übergang charakterisiert die

gute Anpassung des Reflektors auf die Strahlung des Feldes. Es liegen aber viele Heliostaten in diesem Übergangsgebiet. Der Grund hierfür ist eine ungünstige Ausrichtung der Frontplatte des Meßstandes. Sie ist etwas zu weit in Richtung Norden ausgerichtet. Das erkennt man auch daran, daß die 90 %-Transmission-Höhenlinie im Norden weit über das Feld hinausreicht.

Der Reflektor wurde zu Testzwecken gebaut, er soll nicht in einer Anlage zur Wärme- oder Stromerzeugung eingesetzt werden. Die durchgeführten Messungen werden immer mit Simulationsrechnungen verglichen, um deren Gültigkeit zu überprüfen. Die ungünstige Ausrichtung des Meßstandes wird in der Simulation berücksichtigt und spielt deswegen für die Beurteilung der Meßergebnisse keine Rolle.

## 4.2 Optische Messungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine optische Meßmethode zur Charakterisierung des Strahlungstransfers in nichtabbildenden Reflektoren entwickelt. Bisher wurden an nichtabbildenden Sekundärreflektoren üblicherweise kalorimetrische Messungen durchgeführt. Die Strahlungsleistung auf der Eintrittsapertur wurde mit kalorimetrischen oder fotometrischen Methoden bestimmt und die absorbierte Leistung im Absorber oder einem Kalorimeter gemessen (Suresh 1990; O'Gallagher 1995; Schöffel 1995; Groer 1998). Dabei ist es schwierig, zwischen den Verlusten im Reflektor durch Absorption und Strahlumkehr einerseits und den thermischen Verlusten im Absorber oder Kalorimeter andererseits zu unterscheiden. Außerdem wurde bisher noch nie die Transmission eines nichtabbildenden Reflektors mit der vollen vierdimensionalen Auflösung des Phasenraums der geometrischen Optik gemessen.

Die hier vorgestellte Methode erlaubt die Analyse des Strahlungstransfers durch einen nichtabbildenden Reflektor mit vierdimensionaler Auflösung. Als rein optische Methode ist sie unbeeinflusst von den thermischen Eigenschaften des Absorbers. Verluste durch Strahlumkehr werden direkt sichtbar gemacht.

### 4.2.1 Die Meßmethode

Die Meßmethode basiert auf der Umkehrbarkeit des Strahlweges in der geometrischen Optik. Beim geometrischen Weg eines Strahles durch ein optisches System sind Anfang und Ende austauschbar, sofern keine Strahlaufspaltung vorliegt.

Blickt man auf die Eintrittsapertur eines nichtabbildenden Reflektors, in dessen Austrittsapertur eine diffus leuchtende Lichtquelle platziert ist, sieht man auf der Eintrittsapertur ein Muster von dunklen und hellen Gebieten. Durch die hellen Gebiete kommt Strahlung von der Austrittsapertur zum Beobachtungspunkt, durch die dunklen Gebiete nicht. Kehrt man den Strahlweg um, kann also vom Beobachtungspunkt aus nur Strahlung, die auf die hellen Gebiete auf der Eintrittsapertur fällt, auch die Austrittsapertur erreichen. Strahlung, die auf die dunklen Gebiete fällt, wird im Reflektor umgekehrt und erreicht nicht die Austrittsapertur (s. Abbildung 4-4).

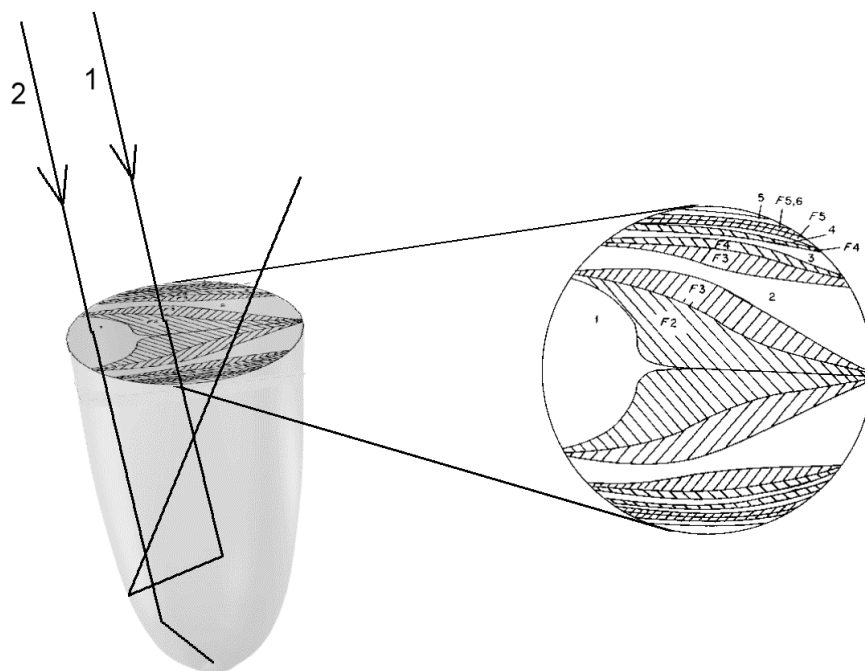


Abbildung 4-4: Gebiete mit Transmission und Strahlumkehr auf der Eintrittsapertur eines CPC-Reflektors. Das abgebildete Muster gilt für Strahlen, die unter einem bestimmten Winkel von links auf die Eintrittsapertur fällt. Strahl 1 fällt auf ein Gebiet mit Strahlumkehr, schraffiert dargestellt. Strahl 2 fällt auf ein Gebiet mit Transmission nach einmaliger Reflexion. Das Muster ist aus (Welford 1989) entnommen.

Die Muster von umgekehrter und transmittierter Strahlung, die aus einer bestimmten Richtung auf die Eintrittsapertur eines nichtabbildenden Reflektors fällt, wurden bereits von Welford und Winston mit Strahlverfolgungssimulationen berechnet (Welford 1989). Bei der hier vorgestellten Meßmethode werden diese sogenannten Transmissionsmuster von verschiedenen Richtungen aus fotografiert und analysiert.

Die Verluste durch Strahlumkehr sind aus den Fotografien direkt zugänglich. Der Flächenanteil der dunklen Gebiete mit Strahlumkehr an der Fläche der Eintrittsapertur entspricht diesen Verlusten für Strahlung, die vom Beobachtungspunkt ausgeht. Die Vermessung der Flächen ist mit einem Bildbearbeitungsprogramm an einem digitalisierten Bild leicht durchzuführen.

Wesentlich weitergehende Erkenntnisse lassen sich aus den Fotografien in Kombination mit Strahlverfolgungsrechnungen gewinnen. Jede Fotografie kann für eine gegebene Reflektorgeometrie und den bekannten Aufnahmestandort mittels Strahlverfolgung simuliert werden. Der Vergleich von Messung und Simulation zeigt dann charakteristische Abweichungen in den Transmissionsmustern, wenn die Form des Reflektors oder der Standort der Aufnahme in der Simulation nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmen. Durch Variation der Parameter in der Simulation kann man eine optimale Übereinstimmung der simulierten Transmissionsmuster mit den Fotografien erreichen und damit implizit die Form des vermessenen Reflektors mit hoher Genauigkeit bestimmen.

Dies konnte im Rahmen einer Diplomarbeit gezeigt werden (Walther 1998). Die dort verwendeten Fotografien wurden am WIS in einem abgedunkelten Labor gemacht. Dadurch waren sehr kontrastreiche Aufnahmen möglich. Der untersuchte Reflektor wird in der ersten thermischen Stufe einer Testanlage am WIS eingesetzt. Es konnten Abweichungen in der Form des Reflektors bis zu 1 % der Länge des Reflektors unterschieden werden (Timinger 1998).

Somit ist diese Meßmethode auch eine weitere optische Methode zur Bestimmung der Form von nichtabbildenden Reflektoren. Auch fotogrammetrische Methoden (Shortis 1997; Johnston 1998) versuchen digitalisierte Fotografien mit Simulationen möglichst exakt zu rekonstruieren, um dadurch Rückschlüsse auf die Form des Reflektors zu ziehen. Hierbei muß jedoch ein Muster von Punkten auf die Oberfläche des Reflektors aufgebracht werden, wohingegen die hier vorgestellte Methode prinzipiell berührungsfrei ist.

#### **4.2.2 Durchführung der Messungen**

Die optische Meßmethode wurde für den Sekundärreflektor mit rechteckigem Querschnitt das erste mal ‚in situ‘ angewandt. Der Reflektor befindet sich also nicht in einem abgedunkelten Labor, sondern an der Stelle, wo er auch zur Konzentration der Strahlung vom Heliostatenfeld eingesetzt wird. Die Fotografien wurden vom Heliostatenfeld aus gemacht. Abbildung 4-5 zeigt die Aufnahmesituation.



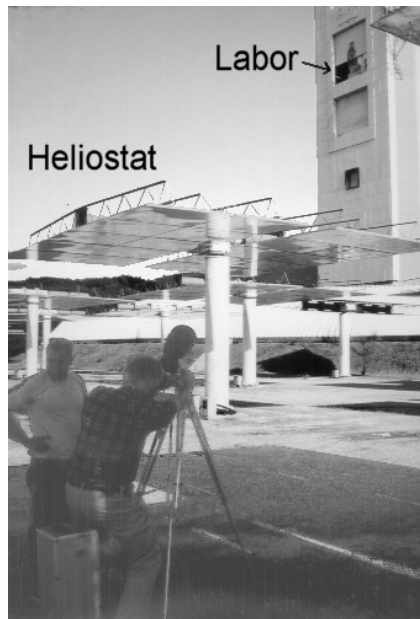


Abbildung 4-5: Aufnahme der Transmissionsmuster ‚in situ‘. Man erkennt im Hintergrund den Turm mit dem halb geöffneten Rollltor des Labors. Im Vordergrund ist der Fotograf zu sehen, dazwischen einige der Heliostaten, die in Parkstellung mit der verspiegelten Fläche nach unten ausgerichtet sind.

Um die Transmissionsmuster zu erkennen, muß man die Strahlung von der diffusen Quelle in der Austrittsapertur des Reflektors eindeutig identifizieren können. Bei den oben erwähnten Laboraufnahmen wurde alle andere Strahlung durch Abdunklung ausgeschlossen. Das ist im Freien nicht möglich. Deswegen wurde als Lichtquelle ein orangefarbener Karton verwendet, dessen Farbe sich eindeutig vom Umgebungslicht unterscheiden läßt. Die Unterscheidung von Gebieten mit Transmission von solchen mit Strahlumkehr ist somit gut möglich, ein deutlicher Helligkeitskontrast wie bei den Laboraufnahmen, wo die Gebiete mit Strahlumkehr wirklich dunkel sind, kann hier nicht erreicht werden. Deswegen kann auch nicht zwischen Gebieten mit Transmission und unterschiedlicher Anzahl von Reflexionen unterschieden werden. Strahlen, die zweimal reflektiert werden, haben aufgrund der Absorptionsverluste bei jeder Reflexion eine geringere Intensität als Strahlen, die nur einmal reflektiert wurden. Bei den Aufnahmen im abgedunkelten Labor können die resultierenden geringen Helligkeitsunterschiede zwischen Gebieten mit Strahlen, die unterschiedlich oft reflektiert werden, deutlich gesehen werden (Timinger 1998).

Der große Abstand zwischen Aufnahmestandort und Reflektor von bis zu 120 m bedingt den Einsatz eines sehr langbrennweitigen Fotoobjektives. Das hier verwendete Objektiv hat eine Brennweite von 800 mm. Die Abbildungseigenschaften des Objektives bestimmen hier die Grenze der Auflösung der Aufnahmen.

Es wurden Aufnahmen von sieben verschiedenen Standorten im Heliostatenfeld gemacht. Abbildung 4-6 zeigt die Standorte auf dem Heliostatenfeld. Die Standorte 1 bis 6 sind so gewählt, daß deutliche Strahlumkehr zu erkennen ist, also am Rand des Akzeptanzbereiches. Am Standort 7 ist keinerlei Strahlumkehr zu erkennen, die Eintrittsapertur des Sekundärreflektors erscheint hier einheitlich orange vom Karton in der Austrittsapertur ausgeleuchtet.

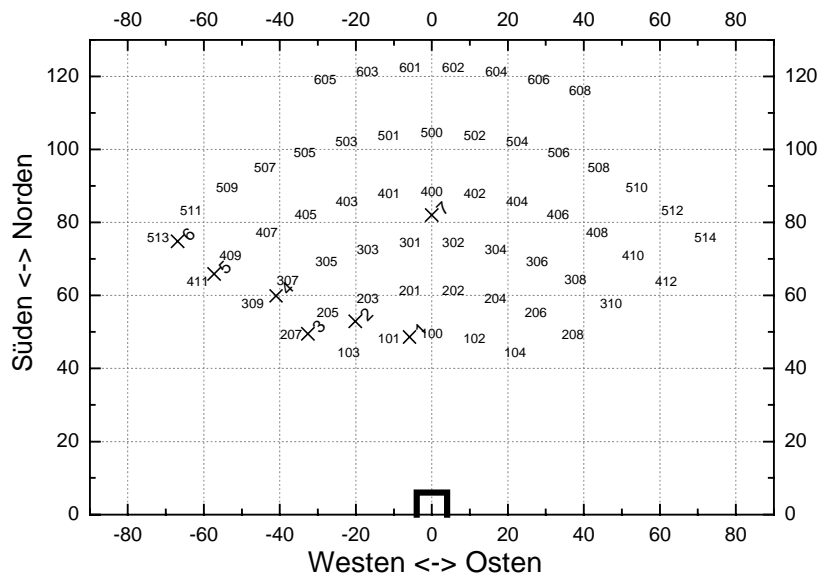


Abbildung 4-6: Standorte für die Aufnahme der Transmissionsmuster auf dem Heliostatenfeld. Die X-Kreuze bezeichnen die Standorte und ihre Nummer. Außerdem sind die Heliostaten und ihre Bezeichnungen eingetragen.

### 4.2.3 Ergebnisse

Abbildung 4-7 zeigt die Fotografie der Transmissionsmuster auf der Eintrittsapertur von Position 1 (s. Abbildung 4-6) aus aufgenommen. Die auf dem Bild orange ausgeleuchteten Gebiete sind kariert unterlegt, da in der Schwarzweißdarstellung die orange Farbe des Lichtes von der Austrittsapertur nicht deutlich hervortritt. Man erkennt die rechteckige Eintrittsapertur des Reflektors. Die Gebiete auf der Eintrittsapertur, die nicht von der orangen Strahlungsquelle in der Austrittsapertur ausgeleuchtet werden, erscheinen hier nicht dunkel, in ihnen wird das Licht vom Heliostatenfeld oder der Umgebung reflektiert. Strahlung, die vom Beobachter ausgehend nicht auf die orangen Gebiete fällt, wird im Reflektor umgekehrt und nicht zur Austrittsapertur übertragen. Durch einfaches Ausmessen kann man den Anteil der orangen Gebiete an der Flächen der Eintrittsapertur auf 43.9 % bestimmen. 56.1 % der vom fotografischen Blickwinkel auf die Eintrittsapertur fallenden Strahlung würde also im Reflektor umgekehrt.

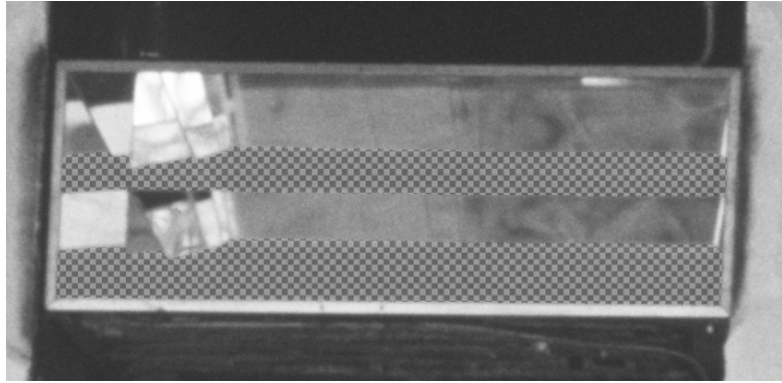


Abbildung 4-7: Aufnahme eines Transmissionsmuster von Position 1 aus gesehen. Die orange ausgeleuchteten Gebiete sind hier kariert markiert. Man erkennt die rechteckige Eintrittsapertur des Reflektors und helle Reflexe auf dem Spiegel, die Umgebungslicht widerspiegeln.

Abbildung 4-8 zeigt das Foto aus Abbildung 4-7 nach der Prozessierung in einem Bildbearbeitungsprogramm. Der Rand der Eintrittsapertur wurde in orange Farbe markiert. Dann wurden die drei Farbkanäle des farbigen Bildes in einzelne Schwarzweißbilder übertragen. Nach Helligkeits- und Kontrastanpassung treten nur noch die vorher orangen Flächen und der künstlich markierte Rand der Eintrittsapertur hell hervor. Die nicht von der Lichtquelle in der Austrittsapertur beleuchteten Flächen bleiben dunkel. Dies entspricht den Bildern, die man im abgedunkelten Labor unter Ausschluß vom Umgebungslicht erhält. Der Kontrast ist optimal und die Darstellung entspricht außerdem auch den Ergebnissen der Simulation.

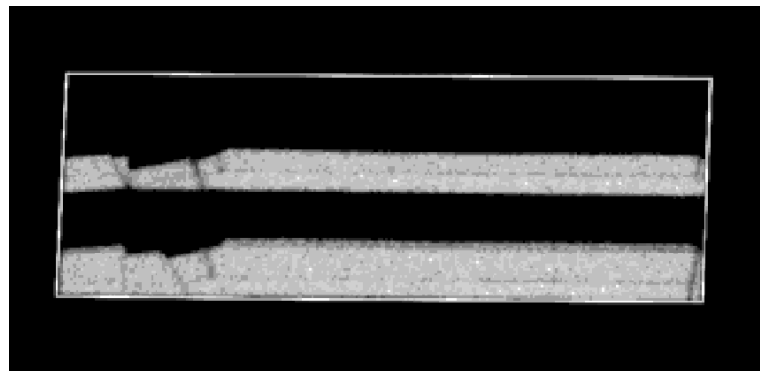


Abbildung 4-8: Das Transmissionsmuster in Abbildung 4-7 nach der Prozessierung. Der Rahmen der Eintrittsapertur wurde markiert. Die orange ausgeleuchteten Gebiete erscheinen hell, das Umgebungslicht ist unterdrückt. Zusätzlich ist der Rand der Eintrittsapertur eingefügt.

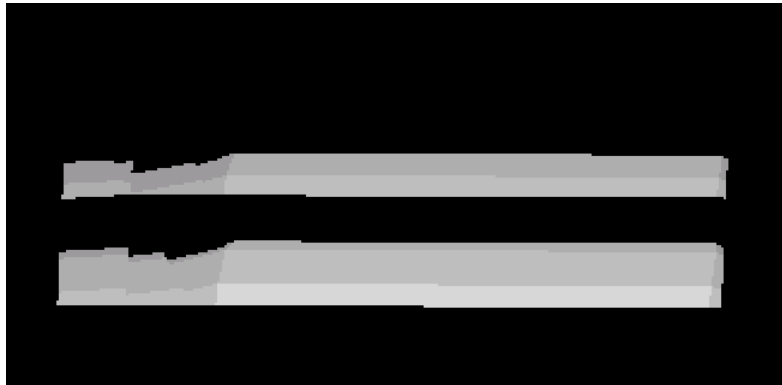


Abbildung 4-9: Simulationsrechnung zu Abbildung 4-8. Der Rand der Eintrittsapertur erscheint hier nicht. Man erkennt deutlich die unterschiedlichen Graustufen, die Strahlung mit unterschiedlich vielen Reflexionen wiedergeben. Bei jeder Reflexion verliert die Strahlung einen Teil ihrer Leistung. Die schmale hellste Fläche rechts unten markiert einen Teil der Austrittsapertur des Reflektors, die hier direkt zu sehen ist. Die Helligkeitskontraste aufgrund unterschiedlich vieler Reflexionen sind in den Messungen kaum zu sehen.

Es wurde ein Computerprogramm erstellt, das die digitalisierten und vorprozessierten Bilder Pixel für Pixel mit Strahlverfolgungssimulation zu reproduzieren versucht (Timinger 1998; Walther 1998). In einer interaktiven Umgebung werden die Eckpunkte der Eintrittsapertur auf dem Foto markiert und der Aufnahmestandort auf dem Heliostatenfeld angegeben. Das Programm berechnet den Bildausschnitt und startet die Simulation. Das simulierte Transmissionsmuster und die Messung können in einer Falschfarbendarstellung überlagert werden, die Übereinstimmungen und Unterschiede hervorhebt. Abbildung 4-9 zeigt das Transmissionsmuster aus einer Simulation der Messung aus Abbildung 4-8. Die Form der Transmissionsmuster stimmt bis auf Abweichungen um wenige Pixel mit der Messung überein.

Jeder Punkt auf den Fotografien repräsentiert die Transmission eines Strahles vom Beobachter aus. Jedes Pixel im digitalisierten Foto oder der Simulation entspricht einem unterscheidbaren Strahl. Die Messungen und die Simulationen zeigen also die Transmission von Strahlung Strahl für Strahl im vierdimensionalen Phasenraum der geometrischen Optik ohne jede Integration. Die zweidimensionale Fotografie zeigt die Transmission im zweidimensionalen Ortsraum auf der Eintrittsapertur von einem Punkt im Richtungsraum, der vom Beobachtungsstandort bestimmt wird. Eine Bewegung des Beobachtungsstandortes bedeutet eine Bewegung im Richtungsraum. Eine Serie von Aufnahmen der Transmissionsmuster von verschiedenen Beobachtungsstandorten ermöglicht also die Messung der Transmission durch den Reflektor mit vierdimensionaler Auflösung.

Die gute Übereinstimmung von Messung und Simulation in Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 wurde allein durch eine Variation der Ausrichtung des Reflektors in der Simulation erreicht. Die Form des Reflektors wurde gegenüber den gemessenen Maßen nicht verändert.

Die Ausrichtung des Reflektors in Nord-Süd-Richtung ist im Aufbau der Messung nur mit einer Genauigkeit von etwa  $1^\circ$  zugänglich, da die optische Achse des Reflektors von außen nicht direkt zu bestimmen ist. In der Simulation können Unterschiede von  $0.1^\circ$  anhand der unterschiedlichen Transmissionsmuster deutlich sichtbar gemacht werden. Die beste Übereinstimmung der Simulationen mit den Messungen für alle Standorte ergab sich für einen Winkel von  $22.2^\circ$  zwischen der optischen Achse des Reflektors und der horizontal nach Norden weisenden Koordinatenachse.

Dieser Winkel ist im bestehenden Aufbau durch die Form der Meßplattform weitgehend vorgegeben. Für das Heliostatenfeld ist der Reflektor damit jedoch nicht optimal ausgerichtet, der Winkel ist deutlich zu klein. Damit die Strahlung vom Heliostatenfeld im Richtungsraum symmetrisch auf die Eintrittsapertur einfällt, müßte der Winkel  $27.3^\circ$  betragen. Der Reflektor wäre in diesem Fall deutlich weiter nach unten weg von der Horizontalen gekippt.

In Abbildung 4-10 werden die Unterschiede in den Transmissionsmustern aufgrund dieser Fehlausrichtung dargestellt. In der Falschfarbendarstellung werden Unterschiede hervorgehoben. Die Simulation für korrekte Ausrichtung ist mit der Messung bei bestehender, falscher Ausrichtung überlagert. Bei korrekter Ausrich-



Abbildung 4-10: Unterschiede in den Transmissionsmustern aufgrund der falschen Ausrichtung des Reflektors. Fotografie mit bestehender und Simulation mit korrekter Ausrichtung sind in einer Falschfarbendarstellung überlagert. Die Unterschiede zwischen Messung und Simulation erscheinen als graue Flächen. In den hellgrau dargestellten Gebieten liegt in der Messung Strahlung vor, in der Simulation jedoch nicht. In den dunkelgrauen Gebieten liegt in der Simulation Strahlung vor in der Messung jedoch nicht. Weiße Flächen bedeuten Übereinstimmung von Simulation und Messung. Der Rand der Eintrittsapertur erscheint hier, weil er bei den Messungen nachträglich hinzugefügt wurde.

tung des Reflektors wären die dunkelgrau dargestellten Flächen Gebiete mit zusätzlicher Transmission, also im Foto orange, die hellgrau dargestellten Gebiete würden für die Transmission wegfallen. Man erkennt, daß die Transmission in diesem Falle deutlich höher wäre, weil die dunkelgrauen Flächen bei weitem überwiegen.

Die Abmessungen des Reflektors, wie er im Labor aufgebaut ist, weichen deutlich von den Vorgaben ab, die aus der Optimierungsrechnung hervorgingen. Der wesentlichste Unterschied besteht in der Vertauschung der Längen der axialen Segmente, aus denen der Reflektor aufgebaut ist (s. Abschnitt 4.1.1). Nimmt man in der Simulation die eigentlich vorgegebenen Abmessungen an, erhält man auch deutlich abweichende Transmissionsmuster. Die Unterschiede zur Messung sind in Abbildung 4-11 dargestellt. Weiße Flächen bedeuten Übereinstimmung von Messung und Simulation. Man erkennt deutliche Abweichungen. Die Flächen der dunkelgrau dargestellten Gebiete sind hier jedoch nur geringfügig größer als die der hellgrauen. Die zusätzliche Transmission durch die falsche Form (hellgrau) wiegt die verlorene Transmission (dunkelgrau) weitgehend auf.



Abbildung 4-11: Unterschiede in den Transmissionsmustern durch abweichende Reflektorgeometrie. Der Reflektor in der Simulation hat hier die Abmessungen, die nach der Optimierung vorgegeben wurden. Die Abweichungen in den Abmessungen des wirklich gebauten Reflektors (s.o.) führen zu signifikanten Abweichungen in den Transmissionsmustern.

### 4.3 Kalorimetrische Messungen

Mit dem Sekundärreflektor mit rechteckigem Querschnitt wurde auch eine Meßreihe unter konzentrierter Sonnenstrahlung durchgeführt. Die von einem einzelnen Heliostaten erzeugte Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Eintrittsaperturbene des Sekundärreflektors wurde vermessen. Hinter der Austrittsapertur des Reflektors wurde ein Kalorimeter angebracht und die dort absorbierte Strahlungsleistung gemessen. Der Quotient aus der eintretenden und absorbierten Strahlungsleistung ergibt die Transmission für Strahlung vom verwendeten

Heliostaten. Diese Messungen wurden für fünf einzelne Heliostaten durchgeführt.

#### 4.3.1 Messung der Bestrahlungsstärkeverteilung

Die Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Eintrittsaperturebene des Sekundärreflektors wurde mit Hilfe der vier Radiometer gemessen, die in die Frontplatte des Meßstandes eingebaut sind (s. Abbildung 4-2). Hierzu wird der Heliostat schrittweise so bewegt, daß das Bild der Sonne, im folgenden kurz Spot genannt, schrittweise über die Radiometer verfahren wird. Die von den Radiometern gemessenen Werte der Bestrahlungsstärke werden am jeweiligen Ort relativ zur Mitte des Spots aufgetragen. Es ergibt sich ein Raster von Punkten im Spot, an denen die Bestrahlungsstärke gemessen wurde. Diese Meßpunkte werden durch ein mathematisches Modell angenähert. Als Modellfunktionen wurden hier ein zweidimensionales Polynom dritter Ordnung eingesetzt. Anhand der angenäherten Bestrahlungsstärkeverteilung wird dann die auf die Eintrittsapertur einfallende Leistung berechnet. Abbildung 4-12 zeigt die Bestrahlungsstärkeverteilung, wie sie von einem Heliostaten erzeugt wird. Hier ist der gesamte Spot bis hin

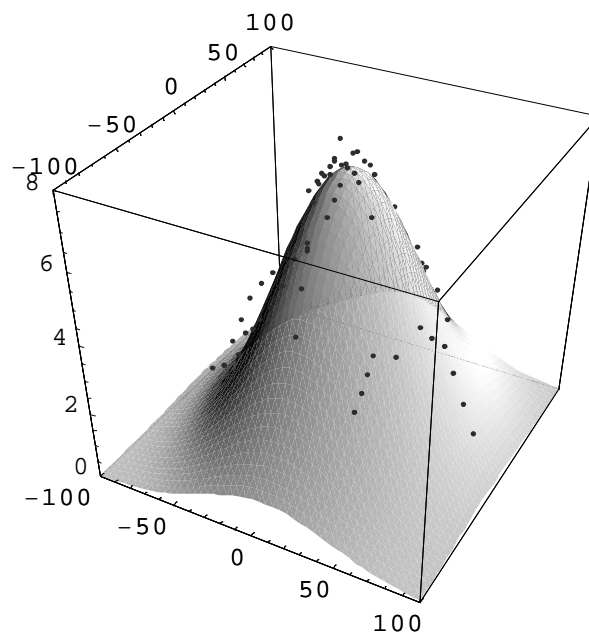


Abbildung 4-12: Die Bestrahlungsstärkeverteilung, produziert vom Heliostaten mit der Nummer 100 (s. Abbildung 4-3) auf der Eintrittsaperturebene des Sekundärreflektors. Die angenäherte Gaussverteilung hat zwei verschiedene Momente und eine beliebige Ausrichtung der Hauptachsen. Die schwarzen Punkte sind Meßwerte. Es sind nur die Meßwerte zu sehen, die oberhalb der Gausskurve liegen. Die Einheiten in der Ebene sind Zentimeter, die Einheiten in der Höhe sind beliebig. Die x-Achse zeigt nach rechts vorne, die y-Achse nach hinten.

zum Rand dargestellt. Um eine möglichst gute Approximation mit der angenäherten Funktion im für die Messung relevanten Bereich zu erreichen, wurden für die Berechnung der eingestrahnten Leistung auf die Eintrittsapertur des Sekundärreflektors nur solche Meßpunkte berücksichtigt, die auf der Eintrittsapertur des Reflektors oder in ihrer nahen Umgebung liegen. Das sind zwischen 35 und 50 Meßpunkte.

Die relativen Abweichungen der einzelnen Meßwerte von der angenäherten Funktion liegen zwischen 10 % und 15 %.

### 4.3.2 Messung der absorbierten Leistung im Kalorimeter

Für die Messung der Strahlungsleistung, die durch die Austrittsapertur den Reflektor verläßt, wurde an Stelle eines Absorbers ein Kalorimeter angebracht.

Das Kalorimeter ist als zylindrischer Hohlraum ausgelegt, auf dessen einer flachen Seite die rechteckige Eintrittsapertur ausgespart ist, die auf die Austrittsapertur des Reflektors angepaßt ist. Auf den Innenwänden sind Kühlschlangen angebracht, die Außenseite ist wärmegeklämt. Die Strahlung tritt durch die Eintrittsapertur in den Hohlraum ein und wird an den dunklen Wänden absorbiert, die absorbierte Leistung wird an das Wasser in den Kühlschlangen übertragen. Der Wasserdurchfluß und die Ein- und Austrittstemperatur des Kühlwassers werden mit Thermoelementen gemessen. Der Temperaturunterschied beträgt jeweils weniger als 6 K. Durch den geringen Temperaturunterschied erreicht man sehr geringe Wärmeverluste aus dem Kalorimeter an die Umgebung durch Wärmeleitung oder Wärmestrahlung.

### 4.3.3 Durchführung der Messungen

Die Vorgehensweise der Messungen für einen einzelnen Heliostaten war folgende: Der Heliostat wurde so ausgerichtet, daß der Mittelpunkt des Spots im Zentrum der Eintrittsapertur des Heliostaten lag. Es wurde gewartet, bis die vom Meßcomputer angezeigte Leistung im Kalorimeter im Gleichgewicht war. Der Zeitpunkt wurde notiert und einige Minuten weitergemessen. Im Anschluß wurde der Heliostat jeweils um einen Getriebeschritt bewegt und etwas gewartet. Die Getriebe der Heliostaten erlauben die schrittweise Bewegung um zwei unabhängige Achsen. In einer Meßreihe wird der Heliostat so bewegt, daß der Spot vom Zentrum der Eintrittsapertur schrittweise in eine Richtung fortbewegt wird, zum Beispiel in östlicher Richtung. Zu Beginn der nächsten Meßreihe wird der Spot wieder zum Zentrum der Apertur gefahren, und dann schrittweise nach Westen bewegt. Ausgehend vom Zentrum wurde der Spot also insgesamt in vier verschie-



dene Richtungen entsprechend der positiven oder negativen Drehung des Heliostaten um eine der beiden Achsen bewegt. Die exakte Bewegungsrichtung des Spots ist dabei abhängig vom Standort des Heliostaten und dem Sonnenstand. Im wesentlichen entsprechen die Richtungen aber Bewegungen nach oben, unten, Westen und Osten. Die Durchführung aller vier Meßreihen zusammen benötigt etwa eine Stunde.

Aus jeder der vier Meßreihen erhält man vom Beginn Werte für die absorbierte Leistung im Kalorimeter bei zentral ausgerichteten Spot. Aus dem weiteren Verlauf jeder Meßreihe gewinnt man mit Daten der Radiometer die Meßwerte für die Bestrahlungsstärkeverteilung im Spot.

#### 4.3.4 Ergebnisse

Bei der Auswertung der Kalorimeterdaten fällt auf, daß die Werte für eine einzelne Messung zwar relativ stabil sind, die Werte für die vier verschiedenen Messungen sich jedoch signifikant unterscheiden (s. Abbildung 4-13). Der Grund für die Änderungen dürfte darin liegen, daß sich die Bestrahlungsstärkeverteilung im Spot mit der Zeit im Laufe der Messung ändert. Die Sonne zieht weiter über den Himmel und damit verändert sich der Spot, also das Bild der Sonne, das vom Heliostaten auf die Eintrittsaperturebene geworfen wird. Eine wichtige Rolle spielt hierbei der Astigmatismus des Heliostaten.

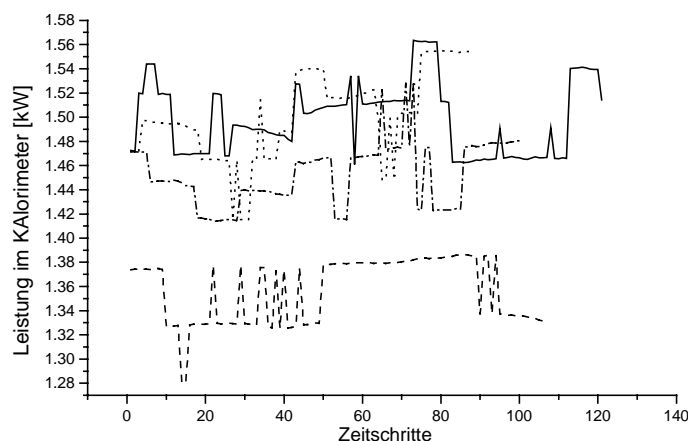


Abbildung 4-13: Im Kalorimeter absorbierte Leistung für die vier verschiedenen Meßreihen mit einem Heliostaten. Die Daten sind renormiert, um die leichten Schwankungen in der Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auszugleichen. Man erkennt große Schritte in den einzelnen Kurven, die die Auflösung der verwendeten Thermoelemente wiedergeben. Während die einzelnen Kurven in sich relativ geringe Schwankungen aufweisen, sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven signifikant.

Die Transmission der Strahlung durch den Reflektor ist der Anteil der im Kalorimeter absorbierten Leistung an der auf die Eintrittsapertur des Reflektors einfallenden Strahlungsleistung. Der relative Fehler der Transmission wird auf etwa 20% abgeschätzt. Der Fehler setzt sich im wesentlichen aus der Variation der gemessenen Werte für die Bestrahlungsstärke und der im Kalorimeter absorbierten Leistung zusammen. Weitere Fehlerquellen sind die Kalibrierung der Radiometer und die Bestimmung der Reflektivität der verwendeten Spiegel. Abbildung 4-14 zeigt die resultierenden Transmissionswerte für Strahlung von den verwendeten Heliostaten zusammen mit Ergebnissen aus Strahlverfolgungsrechnungen. Die gemessenen Werte stimmen innerhalb der Fehlergrenzen befriedigend mit den Simulationsergebnissen überein.

Die hohe Genauigkeit der neuen optischen Meßmethode ist mit kalorimetrischen Messungen nicht zu erreichen.

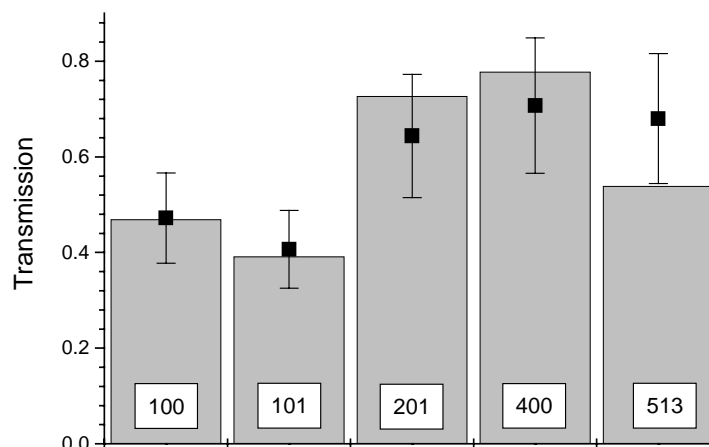


Abbildung 4-14: Transmission durch den Reflektor für Strahlung einzelner Heliostaten aus den kalorimetrischen Messungen. Die schwarzen Quadrate sind die gemessenen Werte, die grauen Balken stellen die aus Strahlverfolgungsrechnungen gewonnenen Werte dar. Die Zahlen unten sind die Nummern des in der Messung verwendeten Heliostaten.

---

## 5 Ausblick

### 5.1 Reflektoren für den Randbereich der Fokalebene eines Heliostatenfeldes

#### 5.1.1 Strahlung

In Abschnitt 3.4 wurden optimierte asymmetrische Sekundärreflektoren vorgestellt, die für den zentralen Bereich der Fokalebene eines Heliostatenfeldes ausgelegt sind. Im zentralen Bereich ist die Strahlung im Orts- und Richtungsraum verhältnismäßig gleichmäßig verteilt. Die Reflektorformen wurden deswegen für homogene Strahlung entworfen, die geringe Inhomogenität der Strahlung bei der Optimierung aber natürlich berücksichtigt.

Je weiter man sich in der Fokalebene vom Zentrum entfernt, desto ausgeprägter werden die Inhomogenitäten der Strahlung im Orts- und im Richtungsraum. Die Bestrahlungsstärke fällt nach außen hin deutlich ab. Eine Apertur am Rand des Spots ist also an der Innenseite, zur Mitte hin, immer deutlich stärker ausgeleuchtet als am äußeren Rand. Am äußeren Rand kommt die Strahlung bevorzugt von den entfernten Heliostaten, die ein größeres Bild der Sonne auf die Aperturebene werfen, während zum Zentrum hin die näheren Heliostaten auch noch eine Rolle spielen. Diese Zusammenhänge sind in Abschnitt 2.3 an Hand eines konkreten Heliostatenfeldes dargestellt, besitzen aber generelle Gültigkeit.

In einem zweidimensionalen Nord-Süd-Schnitt wird die Abhängigkeit von Orts- und Richtungsverteilung der Strahlung besonders deutlich. Abbildung 5-1 zeigt die Strahlung im Phasenraum auf der Fokalebene in einem solchen Schnitt. Das Heliostatenfeld erstreckt sich vom Fuß des Turmes 200 Einheiten in nördlicher Richtung. Der Turm ist 100 Einheiten hoch. Strahlung vom entfernten Ende des Feldes hat in dieser Darstellung negative  $k_x$  Werte. Man sieht, daß im Zentrum der Apertur die Strahlung aus einem nahezu konstanten Richtungsbe-  
reich kommt, der symmetrisch um  $k_x=0$  verteilt ist. Diese Strahlung paßt gut zu der Strahlung, für die zum Beispiel ein CPC-Reflektor ausgelegt ist. Diese Strahlung ist als grau schraffiertes Rechteck eingezeichnet. Am Rand der Apertur kommt die Strahlung mit zunehmender Entfernung zum Zentrum nur noch vom entfernten Ende des Feldes. Die hier verfügbare Strahlung paßt nicht gut zu der im Richtungsraum symmetrisch verteilten Strahlung, für die der CPC-Reflektor ausgelegt ist. Ein solches Rechteck hätte entweder eine große nicht von vorhan-

dener Strahlung ausgefüllte Fläche oder würde signifikante Anteile der vorhandenen Strahlung nicht einschließen (s. Abbildung 5-1).

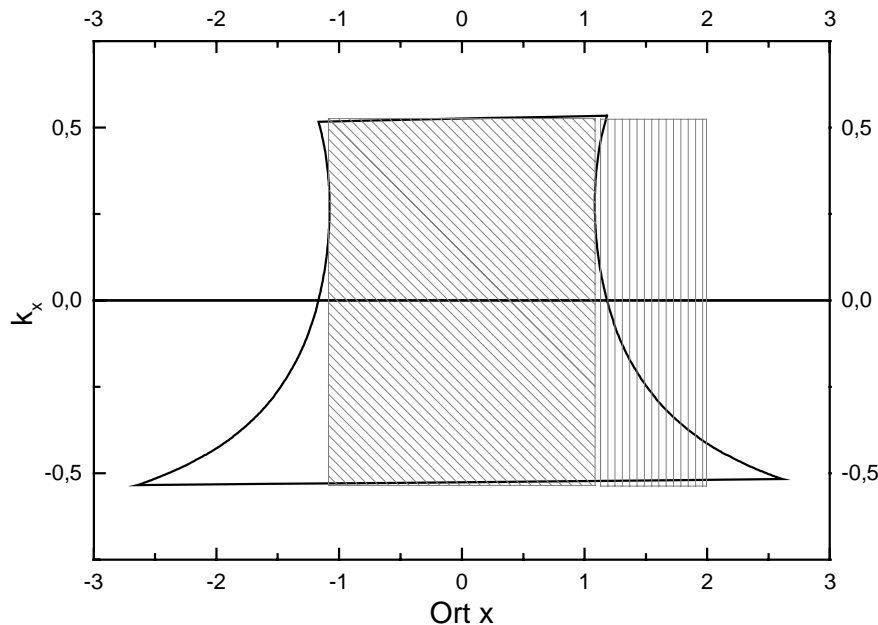


Abbildung 5-1: Strahlungsverteilung in der Fokalebene eines Nord-Feldes im zweidimensionalen Nord-Süd-Schnitt. Das Zentrum der Fokalebene ist am Ort  $x=0$ . Negative Werte von  $k_x$  entsprechen dem entfernten Ende des Heliostatenfeldes. Die Einstrahlung vom Feld füllt das Gebiet innerhalb der schwarzen Linie aus. Die Strahlung, für die ein zweidimensionaler CPC-Reflektor im Zentrum der Fokalebene ausgelegt ist, ist schräg schraffiert. Das senkrecht schraffierte Rechteck umschließt die Strahlung, die ein symmetrischer CPC-Reflektor am Rand der Fokalebene akzeptieren könnte. Man erkennt, daß der größere Anteil akzeptierter Strahlung nicht ausgeleuchtet ist.

Um einen Sekundärreflektor optimal an die Strahlung am Rand der Fokalebene anpassen zu können, muß man für seine Form eine Asymmetrie im Nord-Süd-Schnitt zulassen. Symmetrische Formen akzeptieren Strahlung, die im Richtungsraum in positiver und negativer Richtung gleich weit ausgedehnt sind. Dies paßt nicht zur vorhandenen Strahlung, die ihren Schwerpunkt deutlich bei negativen  $k_x$ -Werten hat, da die Strahlung hier ja vom entfernten Ende des Heliostatenfeldes kommt.

### 5.1.2 Berechnungen für einen Aufbau am WIS

Im siebten Stock des Laborturms am WIS ist eine Testanlage zur Demonstration des thermisch mehrstufigen Konzepts beim Erhitzen des Arbeitsmediums in Solarturmkraftwerken (s. Abschnitt 2.4) aufgebaut. Ein großer zentraler Sekundärreflektor mit zehneckiger Eintrittsapertur ist von einem Ring kleinerer Sekundärreflektoren mit fünfeckigen Eintrittsaperturen umgeben. Die Strahlung

am Rand wird zur Vorheizung des Arbeitsmediums vor Eintritt in den zentralen Absorber genutzt. Die bisher eingesetzten Sekundärreflektoren sind aus flachen und eindimensional gekrümmten Facetten zusammengesetzt und haben regelmäßige fünfeckige Aperturen (Doron 1996; Kribus 1997).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Optimierungsrechnungen mit neuartigen asymmetrischen Formen für einen dieser Reflektoren am Rand durchgeführt. Wegen des bestehenden Aufbaus war die Form der Eintrittsapertur auf ein regelmäßiges Fünfeck festgelegt. Die untersuchten Reflektoren sind aus fünf eindimensional parabolisch gekrümmten Facetten zusammengesetzt. Um die Verbesserungspotentiale durch asymmetrische Formen zu zeigen, wurden zwei Reflektorformen optimiert:

- Eine regelmäßige Form aus fünf identischen Facetten mit regelmäßiger Ein- und Austrittsapertur und
- eine unregelmäßige Form, die Ost-West-Symmetrie aufweist, aber keine Nord-Süd-Symmetrie.

Abbildung 5-2 zeigt einen unregelmäßigen Reflektor.

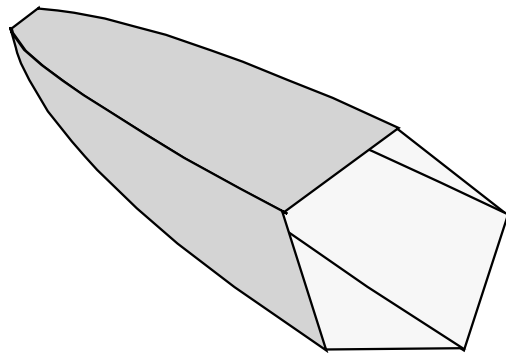


Abbildung 5-2: Asymmetrischer Sekundärreflektor mit fünfeckiger Eintrittsapertur. Der Reflektor ist aus fünf eindimensional parabolisch gekrümmten Facetten aufgebaut. Der Reflektor ist symmetrisch in Ost-West-Richtung (horizontal im Bild). Vorne ist die regelmäßige Eintrittsapertur zu sehen, hinten der Rand der unregelmäßigen Austrittsapertur.

In Abbildung 5-3 sind die aus der Optimierung resultierenden Kennlinien dargestellt. Man erkennt eine deutliche Steigerung der erreichbaren Konzentration bei gleicher Transmission. Bei 85 % Transmission kann die Konzentration durch Einsatz eines unregelmäßigen Reflektors um 15 % gesteigert werden.

Diese Verbesserung ist signifikant, bleibt aber deutlich hinter den Ergebnissen zurück, die für die Strahlung im Zentrum der Fokalebene erreicht werden konnten. Eine Ursache hierfür könnte die Festlegung auf eine regelmäßige Ein-

trittsapertur sein. Diese war durch das Konzept der bestehenden Anlage am WIS vorgegeben.

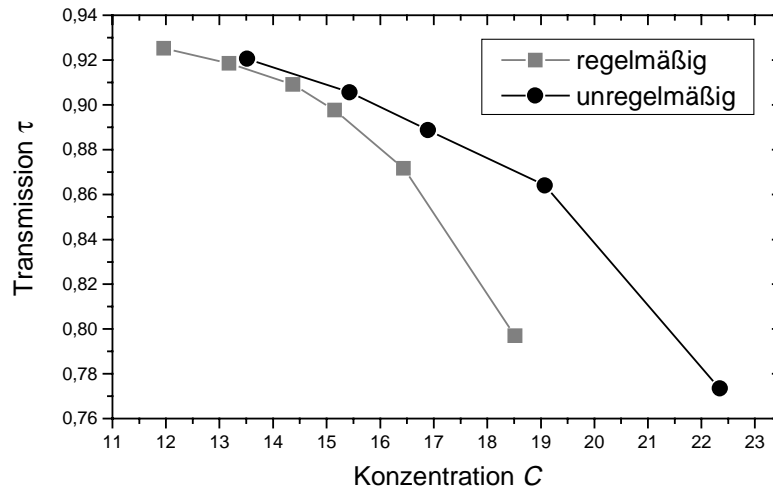


Abbildung 5-3: Kennlinien für Sekundärreflektoren am Rand der Eintrittsapertur. Es sind die Kennlinien für die untersuchten regelmäßigen und unregelmäßigen Reflektorformen dargestellt. Weitergehende Ansätze

In weitergehenden Rechnungen könnten die sehr leistungsfähigen Reflektor-konzepte, die in Abschnitt 3.4 vorgestellt wurden, auf die Situation am Rand der Fokalebene übertragen werden. Die Asymmetrie im Nord-Süd-Querschnitt ist leicht zu integrieren.

Ein Reflektor aus ebenen Facetten könnte rechteckige Aperturen verbinden, die nicht parallel zueinander sind, sondern im Nord-Süd-Schnitt gegeneinander verkippt sind. Ein Reflektor aus eindimensional gekrümmten Facetten hätte rechteckige Ein- und Austrittsaperturen, die nicht parallel zueinander stehen müssen. Die obere und untere Facette im Nord-Süd-Schnitt würden verschiedene parabolische Profile aufweisen. Die rechteckigen Eintrittsaperturen könnten sich gut mit den rechteckigen Aperturen der Reflektoren im Zentrum der Apertur kombinieren lassen. Um eine Gruppe von rechteckigen Reflektoren im Zentrum der Fokalebene, die Ost-West- sowie Nord-Süd-Symmetrie aufweisen, werden dann die beschriebenen Reflektoren für die Strahlung am Rand angeordnet.

Bei der Auslegung der Reflektoren für den Rand müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Da sich benachbarte Reflektoren nicht durchdringen können, muß die Form so eingeschränkt werden, daß die Reflektoren auch im asymmetrischen Nord-Süd Schnitt nebeneinander passen.

- Die Strahlung am Rande der Fokalebene ändert sich deutlich in Abhängigkeit vom Ort. Aus diesem Grund kann man für jede Position am Rand einen eigenen Sekundärreflektor getrennt optimieren. Um den technischen Aufwand zu beschränken, kann man sich aber auch auf eine gemeinsame Form beschränken, die aber dann für die Strahlung an allen relevanten Positionen gleichzeitig optimiert werden muß.
- Es muß von vornherein festgelegt werden, wie weit sich die Reflektoren vom Zentrum weg erstrecken sollen, also welcher Teil der gesamten Strahlung genutzt werden soll. Da die Strahlung gerade am Rand die stärksten und charakteristischsten Inhomogenitäten aufweist, wird die Wahl der Ausdehnung der Aperturen in der Fokalebene die Form der optimierten Reflektoren deutlich beeinflussen.

## 5.2 Optimierung des optischen Konzeptes von Solarturmkraftwerken

Bei den hier bisher vorgestellten Rechnungen wurden die einzelnen Komponenten eines Solarturmkraftwerks getrennt untersucht. Die Heliostatenfelder wurden in ihrer Form als vorgegeben betrachtet. Im Falle des Heliostatenfeldes am WIS ist diese Form das Resultat einer Optimierung, bei der kein Sekundärreflektor berücksichtigt wurde. Die Sekundärreflektoren wurden für die fest vorgegebene Strahlung optimiert. Die Ergebnisse der Optimierung wurden in Kennlinien dargestellt. Diese Kennlinien sind nötig, weil man hohe Transmission gegen hohe Konzentration abwägen muß. Im Endeffekt entscheiden die Rahmenbedingungen des verwendeten Wärme-Kraft-Prozesses, auf welchen Punkt der Kennlinie am effizientesten gearbeitet werden kann.

Bei thermisch mehrstufiger Nutzung entscheidet wiederum der Wärme-Kraft-Prozeß über die Nutzung der Gebiete am Rand mit geringer Bestrahlungsstärke. Wenn man auch mit hoher Konzentration dieser Strahlung die nötige Temperatur nicht mehr erreichen kann, wird diese Strahlung nicht genutzt. Die Bestrahlungsstärkeverteilung in der Fokalebene hängt aber wiederum von der Form des Heliostatenfeldes ab, insbesondere von der Verteilung der Entfernung der Heliostaten von der Fokalebene. Die Beziehungen der Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten des Solarturmkraftwerks und die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades sind in Abschnitt 1 dargelegt.

Der Ansatz der vorliegenden Arbeit war es, Sekundärreflektoren für vorgegebene Strahlung zu optimieren. Mit den vorgestellten Ergebnissen ist es nun mög-

lich, die gesamte optische Konzeption eines Solarturmkraftwerks zu untersuchen und optimal zu gestalten. Die Reflektoren mit rechteckiger Ein- und Austrittsapertur können sich sehr gut an Strahlung aus einem elliptischen Richtungsbe-  
reich anpassen. Ihre Leistungsfähigkeit ist weitgehend unabhängig von der Exzentrizität der Strahlung im Richtungsraum (s. Abschnitt 3.5).

Folgender Ansatz zur Optimierung des optischen Konzepts eines Solarturm-  
kraftwerks wird vorgeschlagen:

Eine Gruppe dieser Klasse von Reflektoren wird in der Fokalebene eines ellip-  
tischen Heliostatenfeldes als Sekundärreflektoren eingesetzt. Um eine einfache  
Konstruktion zu erreichen, haben alle Reflektoren dieselbe Form. Die konzen-  
trierte Strahlung auf den Austrittsaperturen kann thermisch getrennt zur Erhit-  
zung des Arbeitsmediums genutzt werden. Die optimale Umsetzung in  
mechanische Arbeit und elektrische Energie ist erreichbar, wenn die Strahlung  
auf jeder einzelnen Austrittsapertur getrennt genutzt wird (Ries 1995). Für die  
Umsetzung wird der Wirkungsgrad einer Carnot-Maschine eingesetzt. Dieser stellt  
den Grenzwert des physikalisch erreichbaren dar, auch wenn er technisch nicht  
erreicht wird. Zur Optimierung des optischen Konzeptes wird hier der thermische  
Teil idealisiert.

Die Berechnung der Transmission durch die Sekundärreflektoren kann ohne  
explizite Strahlverfolgung geschehen, da sich die Kennlinien der in Abschnitt 3.5  
berechneten Reflektoren gut Parameterisieren lassen. In Abhängigkeit vom mitt-  
lerem Öffnungswinkel der Strahlung und der Richtungsexzentrizität, für die der  
Reflektor ausgelegt ist, können die Kennlinien mit einer Genauigkeit von 2% in  
der Transmission angenähert werden.

Folgende Parameter unterliegen der Optimierung:

- Die Exzentrizität des Heliostatenfeldes und die Entfernung seines Mittel-  
punktes vom Turm in nördlicher Richtung,
- die Neigung der Ebene der Eintrittsaperturen der Sekundärreflektoren,
- der mittlere Öffnungswinkel und die Exzentrizität der akzeptierten Strahlung  
im Richtungsraum,
- der Arbeitspunkt auf der Kennlinie für diese Parameter und damit die Kon-  
zentration und die Transmission für die Strahlung, die innerhalb des vorge-  
sehenen Richtungsbereichs einfallen,
- die Arbeitstemperatur für die Carnot-Maschine auf jeder einzelnen Aus-  
trittsapertur, um jeweils eine optimale Ausnutzung der Strahlung zu errei-  
chen.



Folgende Parameter werden für jede Optimierung vorgegeben:

- Die Fläche der Spiegel des Heliostatenfeldes als Bezugsgröße für die Gesamteffizienz der Anlage,
- die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung,
- die Eintrittstemperatur des Arbeitsmediums,
- die Umgebungstemperatur, gegen die die Carnot-Maschinen arbeiten.

In unterschiedlichen Optimierungsläufen können verschiedene Konzepte untersucht werden. Zum Beispiel kann die Richtungssezentrität der Sekundärreflektoren einmal auf eins festgelegt und dann freigegeben werden. Im Vergleich erkennt man, ob dieser Freiheitsgrad zu deutlichen Verbesserungen im Gesamtwirkungsgrad führt oder nicht. Außerdem kann verglichen werden, ob der Einsatz von mehreren kleinen Heliostatenfeldern, die auf jeweils eine Aperturbene ausgerichtet sind, statt eines großen Heliostatenfeldes Vorteile bringt. Diese Anordnung wird in (Rabl 1976) vorgeschlagen. Sie könnte vorteilhaft sein, weil kleinere Heliostatenfelder weniger Entfernungsunterschiede zwischen einzelnen Heliostaten und Turm aufweisen und deswegen weniger ausgeschmierte Spots erzeugen.

Solche Simulationen und Optimierungen des optischen Konzeptes sind in verschiedenen Ansätzen bereits durchgeführt worden (Segal 1996; Kribus 1998; Segal 1998). Sie beschränken sich jedoch auf herkömmliche rotationssymmetrische Sekundärreflektoren, wodurch die Wahl der Form des Heliostatenfeldes stark eingeschränkt ist.

Erste Testrechnungen zeigen, daß beim Gesamtwirkungsgrad vor allem der Wirkungsgrad des Heliostatenfeldes eine Rolle spielt. Die Form des Heliostatenfeldes paßt sich dementsprechend der optimalen Nutzung der Heliostaten an. Die asymmetrischen Sekundärreflektoren können sich wiederum gut der resultierenden Strahlungsverteilung anpassen. Da der Nutzungsgrad der einzelnen Heliostaten aber nicht nur vom Ort der Heliostaten im Feld, sondern auch vom Sonnenstand abhängt, müßte der Wirkungsgrad für jedes Konzept übers Jahr oder an einer Reihe von ausgewählten Zeitpunkten berechnet werden.



---

## Literatur

- M. Abele, H. Bauer, R. Buck, R. Tamme and A. Wörner (1996). **Design and Test Results of a Receiver-Reactor for Solar Methane Reforming**. Solar Engineering.
- M. Abele, R. Buck, J. Kunberger, T. Denk, P. Heller and E. Lüpfert (1998). **Reiceiver for Solar-Hybrid Gasturbine and CC-Systems**. 9th Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo, France.
- K. Athavaley, F. Lipps and L. Vant-Hull (1979). **An analysis of the terminal concentrator concept for solar central receiver systems**. *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 22: 493-504.
- Bergmann and Schaeffer, Eds. (1971). **Optik**. Lehrbuch der Experimentalphysik. Berlin, De Gruyter.
- M. S. Bohn, T. A. Williams and H. W. Price (1995). **Combined-Cycle Power Tower**. ASME/JSME Int. Solar Energy Conference, Maui, Hawaii.
- M. Born and E. Wolf (1993). **Principles of Optics**. Oxford, Pergamon Press.
- J. Bortz, N. Shatz and H. Ries (1997). **Consequences of Etendue and Skewness Conservation for Nonimaging Devices with Inhomogenous Sources and Targets**. SPIE: Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer IV, San Diego.
- BRO (1997). **ASAP, Advanced System Analysis Program**. Tuscon, Breault Research Organisation.
- M. Brunotte (1996). **Nichtabbildende Optik für einachsige nachgeführte Konzentratorsysteme**. Düsseldorf, VDI-Verlag.
- M. Brunotte, A. Goetzberger and U. Blieske (1996). **Two-stage concentrator permitting concentration factors up to 300X with one-axis tracking**. *Solar Energy* Vol. 56(3): 285-300.
- R. Buck (1989). **Volumetric receivers - potential and problems**. Clean and Safe Energy Forever, Oxford.
- R. Buck, M. Abele, J. Kunberger, T. Denk, P. Heller and R. Lüpfert (1998). **Receiver for Solar-Hybrid Gas Turbine and Combined Cycle Systems**. Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo, France.

- R. Buck, J. F. Muir, R. E. Hogan and R. D. Skocypec (1991). **Carbon dioxide reforming of methane in a solar volumetric receiver.** *Solar Energy Materials and Solar Cells* Vol. 24: 449-463.
- M. J. Carvalho, M. Collares-Pereira, J. M. Gordon and A. Rabl (1985). **Truncation of CPC solar collectors and its effect on energy collection.** *Solar Energy* Vol. 35(5): 393-9.
- G. E. Cohen, D. W. Kearny and H. W. Price (1998). **Performance History and Future Costs of Parabolic Trough Solar Electric Systems.** 9th Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo France.
- P. A. Davies (1992). **Methods of choosing sample rays in ray-tracing computations.** *Applied Optics* Vol. 31( 34): 7277-7282.
- DLR (1998). **Internal Study on Reflectivity and Degradation Of Mirrors in the Framework of the Solar Paces Project.**
- P. Doron and A. Kribus (1996). **Receiver Partitioning: A Performance Boost for High-Temperature Solar Applications.** 8th Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Cologne, Germany.
- J. A. Duffie and W. A. Beckman (1991). **Solar Engineering of Thermal Processes.** New York, John Wiley & Sons.
- D. Feuermann, J. M. Gordon and H. Ries (1998). **Nonimaging optical designs for maximum-power-density remote irradiation.** *Applied Optics* Vol. 37(10): 1835-1844.
- R. P. Friedman and J. M. Gordon (1996). **Optical designs for ultrahigh-flux infrared and solar energy collection: monolithic dielectric tailored edge-ray concentrators.** *Applied Optics* Vol. 35(34): 6684-91.
- R. P. Friedman, J. M. Gordon and H. Ries (1993). **New high-flux two-stage optical designs for parabolic solar concentrators.** *Solar Energy* Vol. 51: 317-25.
- R. P. Friedman, J. M. Gordon and H. Ries (1995). **V-Cones as secondary Concentrators in high-flux solar designs: The overlooked Gem.** ISES Solar World Congress, Simbabwe.
- R. P. Friedman, J. M. Gordon and H. Ries (1996). **Compact high-flux two-stage solar collectors based on tailored edge-ray concentrators.** *Solar Energy* Vol. 56(6): 607-15.
- T. Galal, P. Nardin and J. Mignot (1988). **An analysis for solar central receiver systems with terminal concentrators or variable apertures.** *Solar Energy* Vol. 41: 147-57.

- J. M. Gordon and H. Ries (1993). **Tailored edge-ray concentrators as ideal second stages for Fresnel reflectors.** *Applied Optics* Vol. 32: 2243–51.
- U. Groer and A. Neumann (1998). **Developement and Test of a High Flux Calorimeter at DLR Cologne.** 9th Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo France.
- H. Hinterberger and R. Winston (1966). **Efficient Light Coupler For Cerenkov Counters.** *Review of Scientific Instruments* Vol. 37(8): 1094-1095.
- F. Hundt (1963). **Theorie der Elektrizität und des Lichts . Relativitätstheorie.** Stuttgart, Teubner Verlagsgesellschaft.
- D. Jenkins and R. Winston (1996). **Tailored reflectors for illumination.** *Applied Optics* Vol. 35: 1669-1672.
- G. Johnston (1998). **Vieographic and Photogrammetric Characterisations of Reflective Trough Solar Concentrators.** 9th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo.
- J. Karni, A. Kribus, P. Doron, R. Rubin, A. Fiterman and D. Sagie (1997). **The DIAPR: A High-Pressure, High-Temperature Solar Receiver.** *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 119(1): 74-78.
- J. Karni, A. Kribus, B. Ostraich and E. Kochavi (1997). **A High-Pressure Window for Volumetric Solar Receivers.** *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 120(2): 101-107.
- J. Karni and H. Ries (1994). **Concepts for High Concentration Primary Reflectors in Central Receiver System.** 7th Int. Symp. Solar Thermal Concentrating Technologies, Moscow, Russia.
- B. L. Kistler (1986). **A User Manual for DELSOL3,** Sandia National Laboratories.
- G. J. Kolb, C. E. Tyner, W. Meinecke and F. Trieb (1998). **Solar Thermal Electricity in 1998: present and future prospects of technology sponsored by the IEA SolarPACES group.** 9th Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo France.
- R. J. Koshel and I. A. Walmsley (1993). **Modeling of the gain distribution for diode pumping of a solid-state laser rod with nonimaging optics.** *Applied Optics* Vol. 32(9): 1517-27.
- A. Kribus (1994). **Optical performance of conical windows for concentrated solar radiation.** *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 116: 47-52.

- A. Kribus (1997). **Towards Large-Scale Solar Systems with Peak Concentrations of 20000 Suns**. SPIE: Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer IV, San Diego.
- A. Kribus, P. Doron, J. Karni, R. Rubin, O. B., D. M., D. Sagie and T. E. (1997). **High temperature receivers: Divide and Conquer**. 8th Sede Boquer Symp. Solar Electricity Production, Sede Boquer, Israel.
- A. Kribus, V. Krupkin, A. Yogev and W. Spirkel (1998). **Performance Limits of Heliostat Fields**. *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 120: 240-246.
- A. Kribus, R. Zaibel, D. Carey, A. Segal and J. Karni (1998). **A Solar Driven Combined Cycle Power Plant**. *Solar Energy* Vol. 62(2): 121-129.
- A. Kribus, R. Zaibel and A. Segal (1998). **Extension Of The Hermite Expansion Method For Cassegrain Solar Central Receiver Systems**. *Solar Energy* Vol. 63(6): 337-343.
- J. D. Kuppenheimer, Jr. (1988). **Design of multilamp nonimaging laser pump cavities**. *Optical Engineering* Vol. 27(12): 1067-71.
- L. D. Landau and E. M. Lifschitz (1964). **Klassische Feldtheorie**. Berlin, Akademie Verlag.
- P. L. Leary and J. D. Henkins (1979). **A User's Guide for MIRVAL**, Sandia National Laboratories.
- J. Leon and J. Aranda (1996). **Comparison of Volumetric Receivers Tested in the CRS Facility at the Plataforma Solar de Almeria**. 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Cologne.
- I. Levy and M. Epstein (1998). **Design and Operation of a High-Power Secondary Concentrator**. 9th Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo, France.
- F. W. Lipps and L. L. Vant-Hull (1978). **A Cellwise Method for the Optimization of Large Central Receiver Systems**. *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 20: 505-516.
- J. C. Minano and A. Luque (1983). **Limit of Concentration Under Extended Nonhomogeneous Light Sources**. *Applied Optics* Vol. 22: 2751-2760.
- A. Miron, S. Weis, I. Anteby, E. Taragan and D. Sagie (1998). **A Large Compound Parabolic Concentrator for 500 kWth Solar Thermal Receiver System Design and Evaluation**. 9th Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo, France.
- A. G. Molledo and A. Luque (1984). **Analysis of static and quasi-static cross compound parabolic concentrators**. *Applied Optics* Vol. 23(12): 2007.

- J. F. Muir, R. E. Hogan, Jr., R. D. Skocypec and R. Buck (1994). **Solar reforming of methane in a direct absorption.** *Solar Energy* Vol. 52(6): 467-77.
- J. O'Gallagher, R. Winston, R. B. Diver and A. Mahoney (1995). **Design and Test of a Trumpet Secondary Concnetrator for a Facetted Stretched Membrane Primary in a Dish-Stirling Application.** *Solar Engineering*.
- J. J. O'Gallagher, R. Winston and W. T. Welford (1987). **Axially Symmetric Nonimaging Flux Concentrators with the Maximum Theoretical Concentration Ratio.** *Journal of the Optical Society of America A* Vol. 4(1): 66-68.
- P. T. Ong, J. M. Gordon, A. Rabl and W. Cai (1995). **Tailored Edge-Ray Designs for Uniform Illumination of Distant Targets.** *Optical Engineering* Vol. 34: 1726-1737.
- G. Ouelette, C. E. Waltham, R. M. Drees, A. Poon, R. Schubank and L. A. Whitehead (1992). **Nonimaging Light Concentration Using Total Internal Refelction Films.** *Applied Optics* Vol. 31(13): 2360-2365.
- C. L. Pitman and L. Vant-Hull (1986). **Performance of Optimized Solar Central Receiver Systems as a Function of Receiver Thermal Loss Per Unit Area.** *Solar Energy* Vol. 6: 457-468.
- W. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery (1992). **Numerical Recipes, Second Edition,** Cambridge University Press.
- K. M. Quiston, J. P. Sutherland, M. R. Prairie, J. E. Pacheco and H. Reilly (1998). **Performance of the Solar Two Central Receiver Power Plant.** 9th Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo France.
- A. Rabl (1976). **Comparison of Solar Concentrators.** *Solar Energy* Vol. 18: 93-111.
- A. Rabl (1976). **Optical and Thermal Properties of Compund Parabolic Concentrators.** *Solar Energy* Vol. 18: 497-511.
- A. Rabl (1985). **Active Solar Collectors and their Applications,** Oxford University Press.
- M. Reusch and D. Laing (1998). **Design and Test Results of Second Generation Hybrid Sodium Heat Pipe Receivers For Dish/Stirling Systems.** 9th Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo France.
- M. R. Riaz (1976). **A Theory of Concentrators of Solar Energy on a Central Receiver for Electric Power Generation.** *Journal of Engineering for Power* Vol. 98: 375-84.

- H. Ries (1982). **Thermodynamic limitations of the concentrations of electromagnetic radiation.** *Journal of the Optical Society of America A* Vol. 72(3): 380-385.
- H. Ries, A. Kribus and J. Karni (1995). **Non-isothermal Receivers.** *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 117: 259-61.
- H. Ries and A. Rabl (1994). **Edge ray principle of nonimaging optics.** *J. Opt. Soc. Am. A* Vol. 11(10): 2627-2632.
- H. Ries, N. Shatz, J. Bortz and W. Spirkel (1997). **Consequences of Skewness Conservation for Rotationally Symmetric Nonimaging Devices.** SPIE: Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer IV, San Diego.
- H. Ries, N. Shatz, J. Bortz and W. Spirkel (1997). **Performance Limitations of Rotationally Symmetric Nonimaging Devices.** *J. Opt. Soc. Am. A* Vol. 14(10): 2855-62.
- H. Ries, W. Spirkel and R. Winston (1995). **The cone and the trumpet concentrators in the light of the general edge-ray theorem.** SPIE: Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer III, San Diego.
- H. Ries and R. Winston (1994). **Tailored edge ray reflectors for illumination.** *Journal of the Optical Society of America A* Vol. : 1260-1264.
- U. Schöffel (1995). **Optimierung von Endkonzentratoren für solare Hochflußdichteanwendungen.** Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- M. Schubnell (1992). **Sunshape and Its Influence on the Flux Distribution in Imaging Solar Concentrators.** SPIE.
- A. Segal and M. Epstein (1996). **A Model for Optimization of a Heliostat Field Layout.** 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Cologne.
- A. Segal and M. Epstein (1998). **The Reflective Solar Tower as an Option for High Temperature Central Receivers.** 9th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo, France.
- N. Shatz and J. Bortz (1995). **An inverse engineering perspective on nonimaging optical design.** SPIE: Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer III, San Diego.
- N. Shatz, J. Bortz, H. Ries and R. Winston (1997). **Nonrotationally Symmetric Nonimaging Systems That Overcome the Flux-Transfer Performance Limit imposed by Skewness Conservation.** SPIE: Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer IV, San Diego.



- M. Shortis and G. Johnston (1997). **Photogrammetry: An Available Surface Characterization Tool for Solar Concentrators, Part II: Assessment of Surfaces.** *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 119: 286-291.
- W. Spirkel, H. Ries, A. Timinger and J. Muschaweck (1997). **Optimized Compact Secondary Reflector for Parabolic Troughs with Tubular Absorbers.** *Solar Energy* Vol. 61(3): 153-8.
- W. Spirkel, A. Timinger, H. Ries, A. Kribus and J. Muschaweck (1997). **Asymmetrical Cone-Type Secondary Concentrators for Fresnel Type Reflectors in Solar Towers.** SPIE: Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer IV, San Diego.
- W. Spirkel, A. Timinger, H. Ries, A. Kribus and J. Muschaweck (1997). **Optimized Asymmetric Cone-Type Secondary Reflectors for a North Field of Heliostats.** Proceedings of the ISES Solar World Congress, Korea.
- A. Steinfeld, M. Brack, A. Meier, A. Weidenkaff and D. Wüillemin (1998). **Solar Chemical Reactor Engineering for the Combined ZnO-Reduction and CH<sub>4</sub>-Reforming Process.** 9th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo.
- A. Steinfeld, A. Frei, P. Kuhn and D. Wüillemin (1995). **Solar thermal production of zinc and syngas.** *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 20(10): 793-804.
- D. Suresh (1990). **Some Studies Related to a New Hexagonal Compound Paraboloc Concentrator (HCPC) as a Secondary in Tandem with a Solar Tower.** Stuttgart, DLR.
- D. Suresh, J. O'Gallagher and R. Winston (1990). **Thermal and optical Performance Test Results for Compound Parabolic Concentrators (CPCs).** *Solar Energy* Vol. 44(5): 257-270.
- E. Tanguy, G. Feugnet, J. P. Pocholle, R. Blondeau, M. A. Poisson and J. P. Duchemin (1998). **High energy erbium laser end-pumped by a laser diode bar array coupled to a Nonimaging Optic Concentrator.** *Optics Communications* Vol. 145(1-6): 105-108.
- A. Timinger, H. Ries and W. Spirkel (1996). **An asymmetric CPC-type secondary concentrator for radiation from a north field of heliostats.** 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Cologne, Germany.
- A. Timinger, T. Smith, P. Doron, W. Spirkel, A. Kribus and H. Ries (1998). **Optical in-situ analysis of secondary reflectors for concentrating solar radiation.** 9th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo, France.

- F. Trieb (1998). **Competitive Solar Thermal Power Stations until 2010 - The Challenge of Market Introduction**. 9th Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Odeillo France.
- H. R. Tschudi (1996). **Mapping of Two Families of Rays by a Reflecting Contour**. *Journal of the Optical Society of America A* Vol. (5): 1117-1120.
- C. N. Vittitoe and F. Biggs (1981). **Six-Gaussian Representation of the Angular-Brightness Distribution for Solar Radiation**. *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 27(6): 469-490.
- M. Walther (1998). **Nichtabbildende Optik: Sekundärkonzentratoren für Solarturmkraftwerke, Optimierung von asymmetrischen Formen und Vermessung**. Diplomarbeit, LMU.
- G. Weinrebe, M. Schmitz-Goeb and W. Schiel (1996). **The ASM-150 Stressed Membrane Heliostat: Test Results and Operational Experiences**. Solar Thermal Concentrating Technologies, Cologne, Germany.
- W. T. Welford and R. Winston (1989). **High Collection Non-Imaging Optics**. New York, Academic Press.
- R. Winston (1970). **Light Collection within the Framework of Geometric Optics**. *Journal of the Optical Society of America A* Vol. 60: 245.
- R. Winston (1974). **Principles of Solar Concentrators of a Novel Design**. *Solar Energy* Vol. 16: 89-95.
- R. Winston and W. T. Welford (1979). **Ideal flux concentrators as shapes that do not disturb the geometrical vector flux field: A new derivation of the compound parabolic concentrator**. *Journal of the Optical Society of America A* Vol. 69(4): 536-539.
- R. Winston and W. T. Welford (1997). **Geometrical vector flux and some new nonimaging concentrators**. *Journal of the Optical Society of America A* Vol. 69(4): 245.
- Winter, Sizmann and Vant-Hull, Eds. (1991). **Solar Power Plants**. Berlin, Springer.
- N. Yehezkel, J. Appelbaum, A. Yogev and M. Oron (1993). **Losses in a Three-Dimensional Compound Parabolic Concentrator as a Second Stage of a Solar Concentrator**. *Solar Energy* Vol. 51: 45-51.

---

## Danksagung

Zu guter Letzt möchte ich all denen danken, die auf vielfältigen Wegen für das Gelingen dieser Arbeit mitverantwortlich sind.

- Meinem Doktorvater Prof. Dr. Jochen Feldmann, der mich als ‚ererbtes‘ Mitglied vorbehaltlos in seine Arbeitsgruppe aufgenommen hat und mir jede Unterstützung zukommen ließ. Ich kann mich nicht erinnern, daß er jemals keine Zeit für eine Frage hatte. Ich habe sehr von dem vitalen und produktiven Arbeitsumfeld profitiert und als Exot in der Gruppe die einmalige Gelegenheit gehabt, fundierte Einblicke in die vielfältigen Arbeitsgebiete jenseits des Tellerrandes zu gewinnen.
- Meinem Betreuer Wolfgang Spirk, der die Arbeit die ganze Zeit über fürsorglich begleitet hat. Für seine Ermahnungen, Schritt für Schritt vorzugehen und seine aufmunternden Motivationsversuche, die ich nicht immer mit der ihnen gebührenden Konsequenz verinnerlicht habe. Sie haben mir aber immer geholfen und hoffentlich meistens ihre gewünschte Wirkung nicht völlig verfehlt. Ganz besonders möchte ich mich für den intensiven Einsatz im kreativen Winter ’97/’98 bedanken, in dem der Grundstein für alle neuen Formen von Reflektoren gelegt wurde. Aber auch nach seinem Weggang aus der Gruppe war Wolfgang immer für mich erreichbar und von seiner Hinterlassenschaft habe ich ausgesprochen profitiert, denn was wäre OptASAP ohne RealFunction und GetEffValue.
- Meinem Initiator Harald Ries für sein stetes Augenmerk auf meine Arbeit, seine vielen Ideen und Tips und sein zuverlässiges Urteil, die besonders am Ende deutlich zur Effizienz beigetragen haben. Ich denke da an die ringförmige Strahlung und die Diskussion der ersten Rohfassung.
- Avi Kribus für die fachlich wie menschlich bestmögliche Integration in die Gruppe am WIS. Die lebhafteste Atmosphäre und der anspruchsvolle Ansatz, die Technologie der Zukunft zu entwickeln sind Motivation und Herausforderung.
- Mahmoud Huleihil, Toni Smith und Shmuel für die Zusammenarbeit bei den Experimenten und natürlich Doron, Moshe, Itzhar, Aliashiv und Aharon für die Unterstützung und den technischen Beistand.

- 
- Meinem Diplomanden Markus Walther für den Einsatz und natürlich Pheval, das beste aller Analyseprogramme für optische in-situ Messungen der Transmissionsmuster von nichtabbildenden Reflektoren.
  - Andreas Haugeneder für einen Nachmittag im Sommerfeldkeller mit einem Diaprojektor und zwei Badezimmerspiegeln.
  - Philipp Schramek und Julius Muschaweck für die fachlichen Diskussionen vor Ort auf gleicher Ebene.
  - Rainer Buck, Markus Abele und Torsten Denk vom DLR für die nette Aufnahme, die Diskussionen und die Unterstützung.
  - Tom Kuckelkorn für ein paar nette Problemstellungen außerhalb meines alltäglichen Betätigungsfeldes.
  - Maria Kaldewey und Frau Cunningham für die Arbeit an der Verwaltungsfront. Niemand schätzt effektive Arbeit genug. Bis er sie vermisst.
  - Dem ganzen LS Feldmann. Allen, die dazu gehören und mal dabei waren und die unvergleichlich bunte und lebhaftige Mischung erzeugen: In loser Reihenfolge und mit Anspruch auf Unvollständigkeit: Frau Prömmel, Jochen, Uli, Wolfgang, Martin, Gero, Jürgen, Werner, Nancy, Mingyuan, Corinne, Jörg, Stephan, Andreas, Christian, Martin, Julius, Imke, Stefan, Christoph, Carsten, Michael, Johannes, Patrick, Ralf, Thomas, Ralf, Josef, Gerhard, Martin, Martin, Kim, Luca, Martin, Gerhard, Matthias, Markus, Eric, Olaf, Bernd, Alexander, Wolfgang, Maria, Margit, Ralf, Kai, Wolfgang, Martin, Robert, Stefan, Reiner. Ich habe mir nie andere Kollegen gewünscht.
  - Allen, die in Deutschland Steuern zahlen und mich dadurch so großzügig gefördert haben, vertreten insbesondere von Herrn Bastek beim BEO.
  - Philipp, Wolfgang, Harald, Peter und Andreas fürs Korrekturlesen.

Der abschließende Dank gebührt meiner Familie, auf deren Unterstützung in vielerlei Hinsicht ich immer gebaut habe.

---

## Lebenslauf

von

Andreas Lorenz Timinger

16. August 1969

geboren in München

1975-1979

Grundschule in Grafring und Nürnberg

1979-1988

Gymnasium in Nürnberg und Würzburg

1988

Abitur am Wirsberg Gymnasium in Würzburg

1988-1990

Zivildienst

1990-1996

Physikstudium an der Ludwig-Maximilians-Universität München

1994

Praktikum bei der BEBIG Isotopentechnik und Umweltdiagnostik GmbH in Berlin: 'Konzeption und Aufbau einer Anlage zur Messung der Aktivität von mit Ruthenium<sup>106</sup> kontaminiertem Abwasser'

1994-1995

Diplomarbeit am Lehrstuhl für angewandte Physik: 'Asymmetrischer, dreidimensionaler CPC als Endkonzentrator für eine Gruppe von Heliostaten'

1996

Diplomprüfung in Physik an der Ludwig-Maximilians-Universität München

seit 1996

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl von Prof. Dr. J. Feldmann an der Ludwig-Maximilians-Universität München